

Tesis de Posgrado

Detección de la señal de la isla urbana de calor y de variaciones climáticas

Camilloni, Inés Angela

1995

Tesis presentada para obtener el grado de Doctor en Ciencias de la Atmósfera de la Universidad de Buenos Aires

Este documento forma parte de la colección de tesis doctorales y de maestría de la Biblioteca Central Dr. Luis Federico Leloir, disponible en digital.bl.fcen.uba.ar. Su utilización debe ser acompañada por la cita bibliográfica con reconocimiento de la fuente.

This document is part of the doctoral theses collection of the Central Library Dr. Luis Federico Leloir, available in digital.bl.fcen.uba.ar. It should be used accompanied by the corresponding citation acknowledging the source.

Cita tipo APA:

Camilloni, Inés Angela. (1995). Detección de la señal de la isla urbana de calor y de variaciones climáticas. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires.
http://digital.bl.fcen.uba.ar/Download/Tesis/Tesis_2781_Camilloni.pdf

Cita tipo Chicago:

Camilloni, Inés Angela. "Detección de la señal de la isla urbana de calor y de variaciones climáticas". Tesis de Doctor. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires. 1995. http://digital.bl.fcen.uba.ar/Download/Tesis/Tesis_2781_Camilloni.pdf

EXACTAS UBA

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales



UBA

Universidad de Buenos Aires

UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

Tema de Tesis

Detección de la señal de la isla urbana de calor y de variaciones
climáticas

Autor

Inés Angela Camilloni

Director

Vicente Barros

Lugar de trabajo

Departamento de Ciencias de la Atmósfera

Trabajo de Tesis presentado para optar por el título de Doctor de la
Universidad de Buenos Aires

1995

#2781
42

*A Rubén y Tomasito,
A mis padres,
A Corina,*

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Vicente Barros, por su dirección entusiasta, optimista y creativa, por su confianza en mi trabajo y buena disposición a mis consultas.

A la Dra. María Luz Duarte, del Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera, por sus valiosos comentarios y sugerencias, y por facilitarme la base de datos hemisféricos utilizada en esta Tesis.

A la Lic. Silvia Nuñez, al Tec. Met. Néstor Ramos y al Inspector Héctor Lobo, del Servicio Meteorológico Nacional, por su colaboración en la identificación de estaciones urbanas y rurales en la República Argentina.

Al Lic. Norberto García, de la Universidad del Litoral, por proporcionarme la información de la estación Inmaculada Concepción.

A la Lic. María Isabel Gassmann, por su amistad y generosidad para responder mis consultas acerca de sus trabajos vinculados con la contaminación del aire en la ciudad de Buenos Aires.

A la Universidad de Buenos Aires por otorgarme la beca de investigación durante la cual esta tesis fue realizada.

A todos mis compañeros del Departamento de Ciencias de la Atmósfera, y en especial a Elizabeth Castañeda, Matilde Rusticucci, Gustavo Escobar y Juan Carlos Torres, por su enorme solidaridad y cariño.

A Rubén, por su amor, comprensión y paciencia.

A mi familia, y muy especialmente a mis padres, sin cuyo cuidado, apoyo y estímulo permanentes, no hubiera podido realizar, y especialmente terminar, esta Tesis.

INDICE

CAPITULO I

Introducción.....	1
1.1. La isla urbana de calor	1
1.1.1. Consideraciones generales	1
1.1.2. Evidencias de la IUC.....	4
1.1.3. Causas de la IUC.....	6
1.1.4. Cuantificación de la IUC	7
1.1.5. Estructura vertical de la IUC	8
1.1.6. Consecuencias de la IUC.....	9
1.2 La urbanización y el calentamiento a escala regional o global	10
1.3. Objetivos.....	11

CAPITULO II

Modelo de estimación de la isla urbana de calor	14
2.1. Introducción	14
2.2. Descripción del modelo	15
2.2.1. Selección de variables.....	16
2.2.2. Información utilizada.....	17
2.2.3. Verificación del modelo.....	24
2.3. Estimación de la temperatura media regional	32
2.4. Conclusiones.....	37

CAPITULO III

Estimación de la intensidad de la isla urbana de calor

en la ciudad de Buenos Aires 38

3.1. Características de la ciudad de Buenos Aires 38

3.2. Información disponible para el estudio de la isla de calor de la ciudad de Buenos Aires 39

3.3. Estimación de la temperatura "rural" de Buenos Aires.....41

3.3.1. Análisis de la influencia del Río de la Plata sobre los promedios anuales de temperatura 41

3.3.2. Aplicación del modelo..... 42

3.4. Estimación de la isla urbana de calor de la ciudad de Buenos Aires 47

3.5. Análisis y posibles causas del cambio de tendencia en la intensidad de la isla urbana de calor de Buenos Aires a partir de mediados de la década del '60 48

3.5.1. Consideraciones generales sobre el Area Metropolitana 48

3.5.2. El impacto de la contaminación del aire 50

3.5.3. El efecto del calentamiento regional 51

3.5.4. Cambios en la circulación a nivel regional..... 53

3.5.4.1. Información utilizada..... 54

3.5.4.2. Determinación de la posición del máximo secundario de presión sobre la costa atlántica de América del Sur 56

3.5.4.3. La posición del máximo secundario de presión y su relación con la temperatura de superficie 59

3.6. Conclusiones..... 60

CAPITULO IV

Análisis de la tendencia de la temperatura en la región subtropical de Argentina: evaluación del efecto urbano 62

4.1. Introducción 62

4.2. Diferencia urbana-rural de la temperatura media anual en función de la población..... 64

4.2.1. Información utilizada..... 65

4.2.2. Regresión entre la intensidad media anual de la IUC y la población 66

4.3. Corrección de tendencias regionales obtenidas a partir de la base de datos de Jones y otros (1991) 69

4.3.1. Descripción de la base de datos de Jones y otros (1991) 69

4.3.2. Identificación y corrección de estaciones con componente urbana..... 71

4.3.3. Temperatura media regional 73

4.4. Conclusiones..... 77

CAPITULO V

Análisis de la tendencia de la temperatura en la región subtropical de Argentina: impacto del calentamiento regional..... 79

5.1. Introducción 79

5.2. Diferencia urbana-rural de la temperatura media anual en función de la temperatura rural 80

5.3. Corrección de temperatura por componente urbana y por efecto de calentamiento regional	83
--	-----------

5.4. Conclusiones.....	89
-------------------------------	-----------

CAPITULO VI

Impacto del calentamiento regional en el cálculo de tendencias de temperatura a nivel regional o hemisférico	90
---	-----------

6.1. Introducción	90
--------------------------------	-----------

6.2. Información utilizada.....	91
--	-----------

6.3. Regresiones lineales entre la intensidad media de la isla urbana de calor y la temperatura rural.....	93
---	-----------

6.4. Corrección de series de temperatura regionales o hemisféricas por efecto del calentamiento rural.....	98
---	-----------

6.5. Conclusiones.....	99
-------------------------------	-----------

CAPITULO VII

Conclusiones.....	100
--------------------------	------------

REFERENCIAS	107
--------------------------	------------

CAPITULO I

Introducción

Se revisan conceptos y antecedentes acerca del estudio del efecto de la urbanización sobre la temperatura y se plantean los objetivos de esta Tesis.

1.1. La isla urbana de calor

1.1.1. Consideraciones generales

Los procesos de urbanización e industrialización modifican las características de la superficie terrestre y de la atmósfera local mediante la transformación de sus propiedades radiativas, térmicas, hídricas y aerodinámicas.

La temperatura es una de las variables meteorológicas más utilizadas para caracterizar el clima de una zona urbana. Su importancia se debe a que presenta una marcada sensibilidad frente a los procesos de crecimiento urbano dando origen a la denominada **isla urbana de calor (IUC)**. Este fenómeno hace referencia al calentamiento diferencial que se registra en áreas urbanas en comparación con las zonas rurales próximas a la ciudad.

Algunas características son comunes a la mayoría de las IUC. Una de ellas es la estrecha correspondencia encontrada, especialmente en noches con poca

nubosidad y calma, entre la forma del campo de temperaturas de superficie y la distribución de edificaciones dentro de la ciudad.

Varios autores (Chandler, 1965, 1967; Dettwiller, 1970a; Oke and East, 1971; Piccolo y Steffens, 1987; Moreno García, 1994) encuentran un mismo patrón de isotermas concéntrico dentro de las ciudades que refleja la estructura de edificaciones anular de la mayoría de ellas.

Las singularidades locales que presentan los campos de temperatura de una ciudad reflejan los cambios en las características de la superficie en lo que se refiere a forma y densidad de las construcciones urbanas. En todos los casos, las mayores temperaturas nocturnas se registran en las zonas más densamente construidas, asociadas a mayores superficies y altas capacidades térmicas. En algunas circunstancias, debido a la advección del aire cálido urbano, el máximo de temperaturas de la ciudad se encuentra desplazado a sotavento de las áreas más edificadas (Chandler, 1965).

Las variaciones diarias en la intensidad de la IUC están relacionadas principalmente con la evolución de los distintos términos de la ecuación de balance de energía durante las horas del día y la noche, y con modificaciones en la situación sinóptica regional.

En general, la intensidad máxima se alcanza algunas horas después de la puesta del sol, debido al rápido enfriamiento rural. Más avanzada la noche, el enfriamiento urbano es importante y por lo tanto el desarrollo de la IUC es más lento. Luego del amanecer, el calentamiento rural es más acelerado que el urbano debido a que sus superficies tienen menores capacidades térmicas y mayor exposición a la radiación solar. De esta forma, es frecuente que durante algunas horas del día se desarrolle una "isla fría". Por ejemplo, Chandler (1965) muestra que el porcentaje de islas frías en la ciudad de Londres (Inglaterra) es del 30% en los meses entre febrero y abril.

Por otra parte, varios estudios (Chandler, 1965; Peterson, 1969; Tyson y otros, 1972) indican que entre todos los parámetros meteorológicos que determinan la intensidad del efecto urbano, los más importantes son la estabilidad, la velocidad del viento y la nubosidad. Como resultado de cambios en estos factores, las IUC cambian constantemente de forma e intensidad a lo largo del día (Clarke and Peterson, 1973).

Las diferencias entre ciudades se deben probablemente no sólo a contrastes en la morfología urbana y en la liberación de calor de fuentes antropogénicas, sino también a diferencias en los tipos climáticos de cada región.

Desde el punto de vista estacional, algunas ciudades muestran IUC invernales más intensas que las estivales, mientras que en otras esta característica se invierte. Los mayores contrastes invernales son frecuentemente explicados por la gran liberación de calor doméstico en ciudades frías (Hage, 1972), mientras que las IUC que son más marcadas durante el verano se deberían a la liberación de la energía solar recibida por las construcciones urbanas de ciudades cálidas.

Algunos ejemplos de diferencias estacionales en la intensidad de la IUC son los estudios realizados por Hage (1972) para la ciudad de Edmonton (Canadá) donde el contraste urbano-rural de temperatura alcanza sus valores máximos durante el invierno, y los de Colacino y Rovelli (1983) para Roma (Italia) y Katsoulis y Theoharatos (1985) para Atenas (Grecia) donde la IUC es más intensa durante el verano. Lombardo (1985) analiza el comportamiento de la IUC de la ciudad de San Pablo (Brasil) por medio de información satelital y encuentra mayores valores durante días típicos de invierno que durante el verano.

Ackerman (1985) estudia la evolución diaria y estacional de la IUC de la ciudad de Chicago (Estados Unidos). El comportamiento diario se encuentra ligado al ciclo solar con un máximo que se registra en horas de la noche y un mínimo

durante el día. En el análisis estacional, los máximos valores se observan en el verano bajo condiciones de poca nubosidad y cielo claro.

Con respecto al comportamiento diario y estacional de la IUC de la ciudad de Buenos Aires existen algunos estudios realizados por Camilloni y Mazzeo (1987) y por Rusticucci y Vargas (1991). Camilloni y Mazzeo (1987) analizan los contrastes térmicos entre las estaciones Observatorio Central Buenos Aires y Ezeiza de los meses de enero y julio de 1982. Encuentran que las máximas diferencias se registran durante las horas del día en el mes de julio y durante la noche en enero. Asimismo, detectan una isla fría entre las 18:00 y 19:00 horas durante el mes de enero.

Rusticucci y Vargas (1991) estudian las temperaturas de las 02:00, 08:00, 14:00 y 20:00 horas de las estaciones Observatorio Central Buenos Aires y Ezeiza en el período 1968-80. Los máximos contrastes entre la ciudad y sus alrededores ocurren en las horas nocturnas y a las 14:00 horas encuentran indicios de una isla urbana fría.

1.1.2. Evidencias de la IUC

En ausencia de registros previos al asentamiento de una ciudad en un cierto lugar, la evidencia más clara del efecto urbano es el hecho de la estrecha correspondencia entre el crecimiento de la ciudad y el aumento de la temperatura media y mínima media urbana. Sin embargo, la temperatura máxima de la ciudad no parecería mostrar una dependencia tan directa con la urbanización.

Prohaska (1954) estudia la evolución de la temperatura media anual de la ciudad de Buenos Aires en el período 1920-50 y encuentra un calentamiento con relación a sus alrededores de $0.33^{\circ}/10$ años.

Dronia (1967) presenta resultados sobre el incremento promedio de la temperatura media anual de diversas ciudades del mundo para distintos períodos. Por ejemplo, para las 45 ciudades analizadas en el período 1941-60, la tendencia es de $0.13^{\circ}/10$ años.

En la ciudad de Tokyo (Japón) las temperaturas muestran en el período 1936-1965 una tendencia positiva en la temperatura ($0.36^{\circ}/10$ años), superior a la tendencia regional ($0.01^{\circ}/10$ años). En el período posterior a la Segunda Guerra Mundial, en la que Tokyo resultó casi destruida, la reconstrucción fue muy rápida y la temperatura urbana ascendió 1°C en ese período (1946-63) (Fukui, 1970).

Dettwiller (1970a) encuentra un calentamiento relativo en los promedios anuales de $0.12^{\circ}/10$ años en la ciudad de París en comparación con Lyon (Francia), para el período 1891-1968.

Kukla y otros (1986) estudian distintos grupos de ciudades de Estados Unidos y encuentran un calentamiento máximo para un promedio de ocho ciudades analizadas en el período 1951-80 de $0.34^{\circ}/10$ años.

Camilloni y Mazzeo (1987) hallan tendencias positivas en la temperatura media y mínima media anual de la ciudad de Buenos Aires para el período 1906-85. Los valores hallados son de $0.22^{\circ}/10$ años para la temperatura media y de $0.37^{\circ}/10$ años para la temperatura mínima.

Con respecto a las temperaturas extremas, Fukui (1970) señala que durante el período 1946-63 se registró un aumento en la temperatura mínima más acelerado que en la temperatura máxima. Los mismos resultados con respecto a una tendencia positiva mayor en la temperatura mínima que en la máxima fueron hallados por Dettwiller (1970b) que analizó la evolución de la temperatura de la ciudad de París (Francia) para el período 1891-1968.

Coughlan y otros (1989) analizan las tendencias en las temperaturas mínima y máxima media anual de las ciudades más densamente pobladas de Australia, para diferentes períodos de entre 25 y 45 años. Para las temperaturas mínimas encuentran tendencias positivas en casi todos los casos, con un máximo de 0.38°/10 años en la ciudad de Sidney. La única excepción es Hobart donde no se observa tendencia. Con respecto a la temperatura máxima el signo de la tendencia no muestra un comportamiento uniforme.

1.1.3. Causas de la IUC

El origen de la isla urbana de calor es asignado a diferentes causas. Howard (1833) fue el primero en encontrar evidencias de que la temperatura del aire es con frecuencia superior en la ciudad que en los alrededores y asociaba las mayores temperaturas urbanas observadas en Londres a la liberación de calor resultante de la combustión doméstica e industrial.

Según Kratzer (1956) la isla de calor se debe principalmente al efecto de difusión de los contaminantes urbanos. Mitchell (1961) resalta la mayor capacidad calorífica y conductividad de los edificios y materiales de construcción: las ciudades absorben mayores cantidades de calor que las zonas rurales durante el día que luego liberan durante la noche, para balancear parcialmente la pérdida nocturna de radiación. Otros autores señalan la importancia de la reducción de la evaporación en áreas urbanas (Chandler, 1962, Bornstein, 1968).

Oke (1982) enumera algunos factores que contribuyen con la formación de la IUC, entre los que incluye la modificación de los siguientes términos del balance de energía:

1. *aumento de la radiación de onda corta absorbida* debido a la geometría urbana,
2. *aumento de la radiación de onda larga recibida* como consecuencia de la acción de los contaminantes en suspensión en la atmósfera urbana,

3. *disminución de la pérdida de radiación de onda larga* debido a la geometría urbana,
4. *liberación de calor* por fuentes antropogénicas,
5. *aumento del calor sensible almacenado* por los materiales utilizados en las construcciones,
6. *disminución de la evapotranspiración*,
7. *disminución del transporte turbulento de calor* debido a las menores velocidades del viento en áreas urbanas.

1.1.4. Cuantificación de la IUC

La intensidad de la IUC se mide como la diferencia entre la temperatura de superficie registrada en una estación urbana y la medida en una estación rural próxima a la ciudad. Existen varios estudios que intentan relacionar la magnitud de la IUC con el tamaño de la ciudad, pero en todos los casos se discute sobre cuál sería el parámetro más apropiado para medir el tamaño de una ciudad.

Mitchell (1961) sostiene que una proporción importante de la varianza de la temperatura urbana puede ser explicada por medio de una función de la población. Si bien la población no es una cantidad física como podrían serlo otros parámetros como área urbana, densidad de edificaciones o consumo energético, es una de las cantidades mejor documentadas a lo largo del tiempo en cualquier ciudad, por pequeña que sea.

Otros autores hallan relaciones con altos valores de varianza explicada, cuando además de la población se consideran otros parámetros como velocidad media del viento (Oke, 1973) o nubosidad, presión y velocidad del viento (Moreno García, 1994).

Oke (1979) propone una relación empírica entre la intensidad máxima de la IUC y el logaritmo de la población con diferentes coeficientes para ciudades de

América del Norte y de Europa que le permiten explicar el 96% de la varianza en el primer caso y el 74% en el segundo. A partir de estas curvas se observa que el aumento en la intensidad de la IUC con la población es mayor en América que en Europa.

1.1.5. Estructura vertical de la IUC

En general, la intensidad de la IUC disminuye con la altura (Imamura and Bornstein, 1992). Mientras que en los primeros 100 metros de la capa límite urbana predominan las condiciones isotérmicas durante la noche, en el área rural adyacente por encima de la inversión de origen radiativo se observa que la atmósfera es con frecuencia más cálida que la urbana, dando origen al denominado "efecto cruzado" (Landsberg, 1981) o también llamada "capa cruzada" (Imamura and Bornstein, 1992). Esta capa podría tener su origen en los efectos radiativos de la contaminación del aire urbano (Venkatram and Viskanta, 1977).

En noches con inversiones de temperatura cercanas al suelo en la atmósfera rural, la capa límite urbana es prácticamente neutral debido a los procesos de mezcla. Por encima de esta capa neutral aparecen una o más inversiones de pocos metros de espesor (Machalek, 1977).

Durante el día y bajo condiciones de cielo claro, los gradientes verticales de temperatura tanto en áreas urbanas como rurales son con frecuencia inestables en los primeros 100 metros mientras que por encima de esa capa son neutrales (McCormick and Kurfis, 1966).

Ludwig (1970) propone relaciones entre la intensidad de la IUC nocturna y el gradiente vertical de temperatura, donde la gran dispersión en los datos que presenta se debe a que estos gradientes son los registrados dentro de la ciudad o en localidades a veces distantes.

1.1.6. Consecuencias de la IUC

La isla urbana de calor trae aparejados varios efectos tanto meteorológicos como socioeconómicos, algunos de los cuales son beneficiosos mientras que otros son perjudiciales.

Por ejemplo, en ciudades de climas fríos la necesidad de calefacción y el consiguiente consumo energético es menor debido a la IUC. Landsberg (1981) cita varios ejemplos para diferentes ciudades de Estados Unidos, donde se muestran reducciones de hasta un 8% en el consumo de combustible para calefacción.

Sin embargo, esta relación se invierte durante el verano debido a la mayor necesidad de refrigeración en el interior de las edificaciones urbanas. Debido a que los requerimientos de energía para refrigeración son mayores que para calefacción, la isla urbana de calor resulta en el balance de consumo energético un problema desde el punto de vista económico. Por otra parte, los equipos de aire acondicionado agravan el problema del exceso urbano de calor debido a que liberan grandes cantidades de calor a la atmósfera.

Otro efecto pronunciado de la IUC es sobre la frecuencia y cobertura de nieve en áreas urbanas. Por ejemplo, un estudio de Grillo y Spar (1971) muestra que la probabilidad de nevadas en Manhattan (Nueva York) durante días de invierno y con condiciones favorables para este tipo de precipitación es menor del 30%, en comparación con el 40-50% de los suburbios de la ciudad.

Lindquist (1968) cita que para la ciudad de Lund (Suecia) se registró durante un día del invierno de 1965 una precipitación de nieve de 3 cm en la ciudad mientras que en el área rural próxima fue de entre 6 y 8 cm y que las isolíneas de igual cantidad de nieve caída mostraban una forma concéntrica alrededor de la ciudad, con un mínimo en el centro.

El desequilibrio térmico entre la ciudad y los alrededores también es evidente en las diferencias del último día promedio de heladas primaverales y en el primer día promedio de heladas otoñales. Por ejemplo, en el centro de la ciudad de Washington (Estados Unidos) el último día promedio de ocurrencia de heladas es alrededor de tres semanas antes que en los alrededores (Landsberg, 1981).

1.2 La urbanización y el calentamiento a escala regional o global

La urbanización constituye uno de los procesos a considerar en estudios de cuantificación del posible calentamiento global que se estaría desarrollando, debido a que según diversos autores (Karl y otros, 1988; Jones y otros, 1989) es de esperar que la señal producida por este proceso en los registros de temperatura sea del mismo signo que la resultante del aumento de la liberación antropogénica de gases de efecto invernadero.

Existen evidencias convincentes de que la temperatura media global de superficie es mayor ahora que al comienzo de los registros instrumentales, hace más de un siglo (Jones y otros, 1986a, 1986b; Hansen y Lebedeff, 1987). Aunque los registros de temperatura del hemisferio sur son mucho más cortos y menos representativos que los del hemisferio norte, existe una consistencia entre ambos hemisferios, con el hemisferio sur mostrando un aumento persistente durante los últimos 50 años (Jones y otros, 1986a, 1986b).

Algunos autores (Kukla y otros, 1986; Wigley y Jones, 1988; Wood, 1988; Portman, 1993) sugieren que por lo menos una parte de ese calentamiento podría deberse al crecimiento de los centros urbanos cercanos al emplazamiento de las estaciones meteorológicas consideradas o a estaciones ubicadas dentro de los límites de la ciudad, es decir al denominado efecto de isla urbana de calor.

Sobre la base de una gran cantidad de información de un número importante de ciudades de Estados Unidos, Jones y otros (1989) estimaron que sus análisis previos acerca de la tendencia de la temperatura del hemisferio norte ($0.31^{\circ}/84$ años, para el período 1901-84) (Jones y otros, 1986a), podría tener una componente espúrea inducida por la urbanización del orden de $+0.1^{\circ}\text{C}$ para las ocho primeras décadas de este siglo. Este valor es significativo si se tiene en cuenta que representa la tercera parte de la tendencia total hallada.

Como se mencionó anteriormente, el método más inmediato para identificar el efecto de la urbanización en una serie meteorológica es comparar la información de cada estación con otra estación vecina "rural", es decir libre de la influencia del crecimiento urbano. Sin embargo, esta metodología es de difícil aplicación en escala regional y es prácticamente imposible de utilizar en escala hemisférica, por la falta de estaciones urbanas y rurales próximas en amplias zonas.

Por lo tanto, la realización de estudios regionales es fundamental para:

- comprender la escala potencial del impacto de la urbanización en los promedios hemisféricos y globales de la temperatura,
- determinar márgenes de error apropiados,
- aumentar la confiabilidad de las tendencias halladas en estudios de cuantificación del posible calentamiento global que se estaría desarrollando.

1.3. Objetivos

En análisis de variabilidad climática a escala regional, se presentan inconvenientes debido a que en amplias zonas como Argentina, Chile y Uruguay, no existen series de datos que provengan de estaciones que no hayan sufrido cambios en su ubicación o interrupciones, además de haber sido alcanzadas por el crecimiento urbano.

Por lo tanto, los objetivos de esta tesis son:

1. *Desarrollar* un modelo que permita estimar la intensidad media anual de la isla urbana de calor a partir de promedios anuales de temperatura, válido para una región geográficamente homogénea de la República Argentina que incluya ciudades con altos niveles de población
2. *Aplicar* el modelo propuesto a la ciudad de Buenos Aires, la más importante en cuanto a concentración de población y actividad económica del país y a otras ciudades incluidas en la región de análisis, donde el modelo es válido
3. *Revisar* la confiabilidad de la información utilizada por varios autores en estudios de cambio climático y calentamiento global, desde el punto de vista de la posible presencia de tendencias espúreas en la temperatura debido a efectos antropogénicos no identificados
4. *Analizar* la validez de las tendencias de temperatura hemisféricas y globales a partir de la discusión sobre probables efectos no considerados.

Con esta finalidad, en el **capítulo II** se propone un método a través del cual los efectos del crecimiento urbano pueden ser filtrados de las series de temperatura, haciéndolas aptas para ser utilizadas en estudios climáticos de escala regional o hemisférica. Debido a que el método propuesto es de tipo geográfico, se presenta su aplicación para la región norcentral de Argentina.

En el **capítulo III** se utiliza el modelo propuesto con el objeto de cuantificar el impacto de la urbanización sobre la temperatura de la ciudad de Buenos Aires. Se analizan los resultados obtenidos y se discuten las posibles causas del comportamiento observado. Asimismo, se muestran las ventajas de utilizar el modelo geográfico frente a considerar como información de referencia la proveniente de la estación Ezeiza Aero.

Una de las bases de datos más comúnmente citadas en estudios de cuantificación de tendencias de temperatura hemisféricas y globales es la producida por Jones y otros (1991). En el **capítulo IV** se analiza la presencia de una componente urbana no filtrada en la temperatura media regional obtenida a través de esta base de datos para la región norcentral de Argentina y Chile y oeste de Uruguay.

Debido a que las máximas diferencias de temperatura urbana-rural se registran en las temperaturas mínimas, mientras que en las temperaturas máximas no se observa casi ningún contraste, en los **capítulos V y VI** se estudia, a partir de datos de Argentina, Australia y Estados Unidos, la posibilidad de que la diferencia de temperatura urbana-rural se reduzca en los años más cálidos.

En el **capítulo V** se cuantifica el impacto del calentamiento regional sobre las correcciones de temperatura por efecto urbano en el promedio hallado para la región norcentral de Argentina, mientras que en el **capítulo VI**, a partir de los resultados obtenidos para Australia y Estados Unidos, se estima el impacto que podría tener este efecto en los promedios hemisféricos de temperatura.

Por último, en el **capítulo VII** se resumen las conclusiones de los resultados obtenidos en los capítulos previos.

CAPITULO II

Modelo de estimación de la isla urbana de calor

Se propone un modelo para estimar la temperatura "rural" de ciudades ubicadas en una región geográficamente homogénea de la Argentina. Se analiza su validez y habilidad para estimar series de temperatura locales y regionales.

2.1. Introducción

La intensidad de la isla urbana de calor (ΔT_{u-r}) se define como:

$$\Delta T_{u-r} = T_{urbana} - T_{rural} \quad (2.1)$$

donde T_{urbana} es la temperatura observada en la ciudad y T_{rural} es la temperatura del área rural próxima.

Con frecuencia, no se disponen de registros confiables de T_{rural} debido a que la constante expansión de las ciudades hacia los suburbios hace que las estaciones suburbanas se encuentren en ambientes progresivamente urbanizados y por lo tanto sus registros no se encuentren libres de influencias antropogénicas.

Por otra parte, las estaciones cercanas a los centros urbanos que son usualmente consideradas como estaciones de referencia, son los aeropuertos que,

por lo menos en Argentina, iniciaron sus operaciones hacia fines de la década del '40. De esta forma, el análisis de la evolución temporal de la intensidad de la isla urbana de calor de ciudades argentinas se vería limitado a esa fecha.

Por lo tanto, en este capítulo se propone un modelo de estimación de T_{rural} y de por consiguiente, la intensidad de la isla urbana de calor, de forma que T_{rural} será estimada como la temperatura que tendría el área sobre la que está emplazada la ciudad, si ella no estuviera.

Asimismo, se demostrará que el modelo propuesto podrá ser aplicado para construir series de promedios locales y/o regionales que podrán ser utilizadas en estudios climáticos de períodos más largos que el de muchas de las series originales.

2.2.Descripción del modelo

La suposición realizada sobre la que se basa el modelo sostiene que la temperatura media sobre un período igual o mayor al anual, en una región con gradientes horizontales suaves de las propiedades de superficie, puede describirse a través de una función de la latitud, longitud y altura sobre el nivel del mar:

$$T = T(\text{lat}, \text{lon}, h) + e \quad (2.2)$$

donde lat, lon y h son la latitud, longitud y altura y e es el error.

La dependencia de la temperatura con la latitud y la altura está siempre presente, mientras que la dependencia con la longitud debe considerarse sólo en aquellos casos en que existen montañas o costas con orientación meridional y que modifican la temperatura de superficie.

La hipótesis realizada implica que singularidades locales, como tipo de suelo y vegetación, si bien afectan los ciclos diario y anual de la temperatura, no introducirían cambios significativos en promedios temporales iguales o superiores al anual. Esta hipótesis se demostrará más adelante con referencia a la región de trabajo elegida.

El modelo de temperatura media propuesto es polinomial e incluye los términos lineales, cuadráticos y cruzados de las variables normalizadas de la latitud (LAT), longitud (LON) y altura (H):

$$T = T_o + a_1 LAT + a_2 LON + a_3 H + a_4 (LAT)^2 + a_5 (LON)^2 + a_6 (H)^2 + a_7 LAT \times LON + a_8 LAT \times H + a_9 LON \times H \quad (2.3)$$

donde las variables LAT, LON y H fueron normalizadas como:

$$VAR = (var_{m\acute{a}x} - var) / (var_{m\acute{a}x} - var_{m\acute{i}n}) \quad (2.4)$$

$var_{m\acute{a}x}$ y $var_{m\acute{i}n}$ son los valores máximos y mínimos de cada variable, respectivamente y VAR representa la variable normalizada.

Este tipo de aproximación geográfica fue utilizada anteriormente por Goldreich (1987) para estudiar la distribución espacial de la precipitación en Israel y por Karl y otros (1988) para corregir las diferencias urbano-rurales de temperatura de pares de estaciones ubicadas en diferentes latitudes y alturas. Asimismo, Temeus (1988) utiliza un modelo geográfico para estimar la temperatura decádica de diferentes localidades de una región de la República Argentina.

2.2.1. Selección de variables

El método de regresión múltiple Stepwise (Draper and Smith, 1966) es una técnica estadística útil para analizar la relación que existe entre una variable

dependiente (y) y un conjunto de variables independientes (x_1, x_2, \dots, x_n), además de permitir seleccionar dichas variables de acuerdo con un orden de importancia. El criterio de importancia está basado en la proporción de varianza explicada: la variable independiente que más varianza explica en cada paso es incorporada a la regresión.

Por lo tanto, utilizando este método se pueden calcular los coeficientes a_1, \dots, a_9 y la ordenada al origen T_0 de la ecuación (2.3), así como saber cuáles son las variables geográficas más importantes en la regresión propuesta para cada período analizado.

2.2.2. Información utilizada

Para aplicar el modelo propuesto se eligió el área delimitada por 26°S a 36°S y 57° a 64°W (Figura 2.1). Forma parte principalmente del NE argentino y la topografía es llana con algunas zonas de ondulaciones suaves que no superan los 30 metros de altura. Las características geográficas más importantes son los ríos de la Plata y Paraná, y el delta que conforman en su desembocadura.

La topografía es relativamente sencilla y produce gradientes de temperatura media anual suaves, tal como se muestra en la Figura 2.1. La principal variación de esta variable es con la latitud, aunque existe un gradiente levemente zonal asociado al aumento de la altura del terreno hacia al oeste y a la advección de aire cálido desde Brasil. En la Figura 2.2 se presentan las rosas de viento climatológicas para el período 1981-90 para tres estaciones de la región de análisis (Gualeguaychú Aero, Ezeiza Aero y Reconquista Aero) donde se observa que los vientos predominantes en la región son del sector N-E.

Para ajustar la temperatura media en función de parámetros geográficos se utiliza la información proveniente de 44 estaciones meteorológicas emplazadas en la región seleccionada. El período de análisis es 1929-91. En la Figura 2.1 se muestra

un mapa con la ubicación de las estaciones y en la Tabla 2.1 se indica el período con información disponible en cada una de ellas.

Si bien la región seleccionada es la más desarrollada desde los puntos de vista económico y cultural de la Argentina, no existe ninguna serie de temperatura media anual que esté completa. Sólo la estación Observatorio Central Buenos Aires (ubicada dentro de una ambiente urbano y por lo tanto no incluida en la Tabla 2.1) tiene un registro completo en el período 1929-91.

Las temperaturas medias anuales y quinquenales de cada una de las estaciones fueron calculadas de la siguiente forma:

i) promedios diarios

$$D_{jkl} = (T_{9jkl} + T_{15jkl} + T_{21jkl}) / 3 \quad (2.5)$$

donde D_{jkl} es el promedio diario del día j , del mes k y del año l y $T_{9...}$, $T_{15...}$ y $T_{21...}$ representan las temperaturas de las 09, 15 y 21 HOA. Si falta al menos una de las observaciones diarias se considera que ese día no tiene promedio diario. Asimismo, se aplicaron correcciones a promedios de 24 horas, que dependen del mes y la ubicación de la estación, de acuerdo con las tablas elaboradas por el Servicio Meteorológico Nacional.

ii) promedios mensuales

$$M_{kl} = \sum_{j=1}^N D_{jkl} / N \quad (2.6)$$

M_{kl} es el promedio mensual del mes k , del año l y N es el número de promedios diarios. Si N es menor que 20, se considera que ese mes no tiene promedio mensual.

iii) promedios anuales

$$A_l = \sum_{k=1}^{12} M_{kl} / 12 \quad (2.7)$$

A_l es la temperatura media anual del año l . Se calcula sólo en el caso de que existan los doce promedios mensuales. Se hicieron algunas excepciones en el período 1929-34 debido a la falta de datos. En ese período, en algunas estaciones, se reemplazaron como máximo los promedios mensuales correspondientes a dos meses faltantes, utilizando el promedio sobre 10 años de ese mes. Debido a que se consideró para cada año la información de por lo menos 8 estaciones, estos valores interpolados representan menos del 2% del total de los datos utilizados en el modelo. Por lo tanto, los posibles errores asociados a ellos no introducen diferencias significativas en el resultado final.

iv) promedios quinquenales

$$Q_m = \sum_{l=1}^5 A_l / 5 \quad (2.8)$$

Q_m es la temperatura media del quinquenio m y se calcula sólo si existen los cinco promedios anuales.

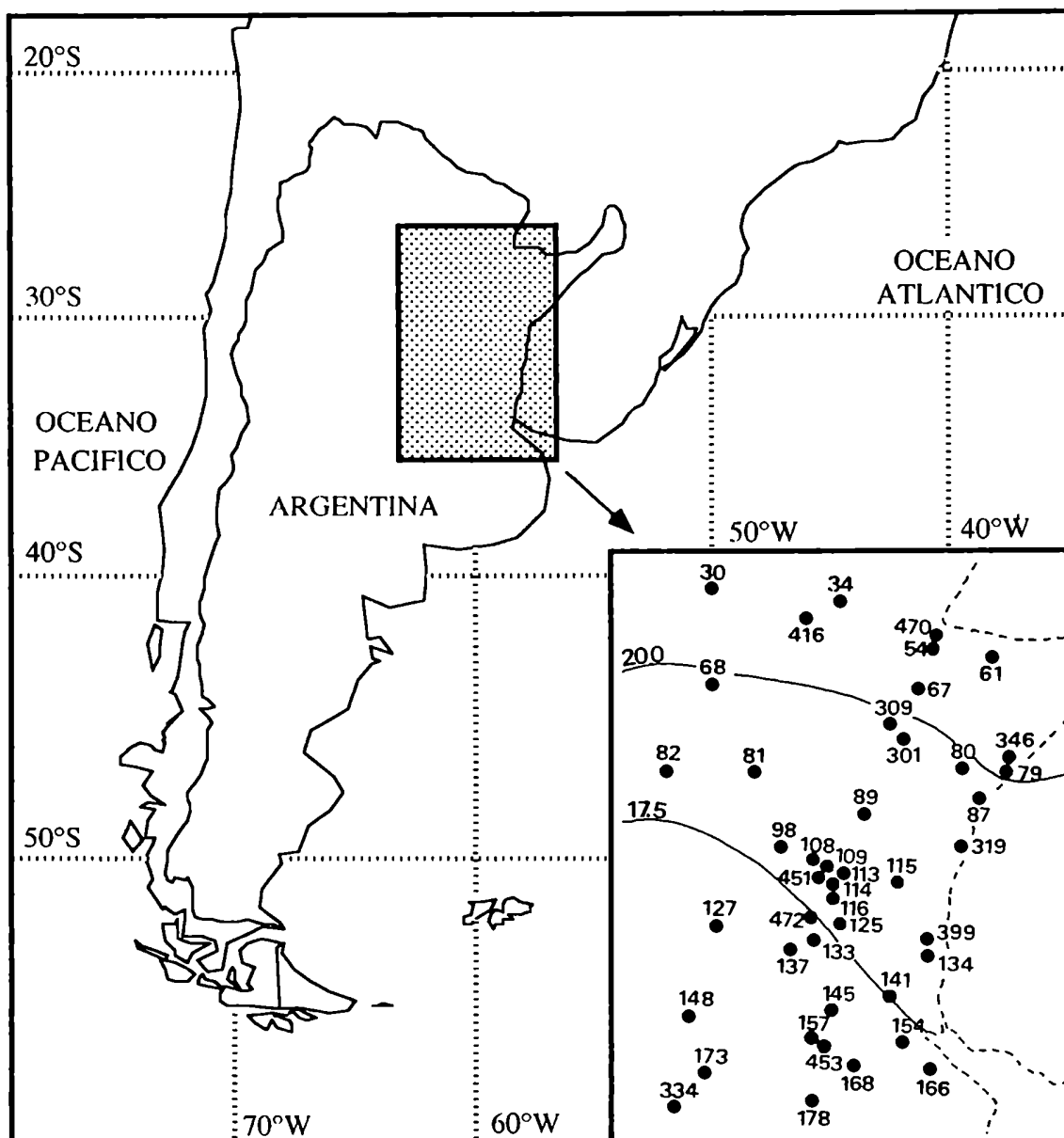


Figura 2.1. Area de estudio. En el detalle se indica la ubicación de las estaciones meteorológicas consideradas y las isotermas de temperatura media anual según Hoffmann (1975).

Estación	lat(S)	lon(W)	h(m)	-30	-40	-50	-60	-70	-80	-90
30	26°35'	62°51'	190	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****
34	26°49'	60°27'	92	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****
54	27°28'	58°49'	60	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****
61	27°45'	57°38'	74	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****
67	28°26'	58°55'	70	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****
68	28°28'	62°50'	106	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****
79	29°43'	57°06'	66	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****
80	29°47'	57°59'	73	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****
81	29°53'	61°57'	88	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****
82	29°54'	63°41'	341	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****
87	30°16'	57°39'	54	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****
89	30°35'	59°58'	25	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****
98	31°11'	61°33'	100	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****
108	31°26'	60°56'	38	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****
109	31°37'	60°41'	18	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****
113	31°47'	60°29'	78	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****
114	31°50'	60°31'	110	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****
115	31°51'	59°05'	43	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****
116	31°56'	60°25'	105	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****
125	32°37'	60°11'	29	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****
127	32°38'	62°41'	130	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****
133	32°55'	60°47'	25	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****
134	33°00'	58°37'	21	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****
137	33°03'	61°09'	72	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****
141	33°35'	59°24'	5	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****
145	33°56'	60°33'	65	*****	*****	*****	*****	*****	*****	*****

Tabla 2.1. Información de temperatura media anual disponible en las estaciones consideradas para hallar los parámetros del modelo geográfico propuesto (1929-91).

Estación	lat(S)	lon(W)	h(m)	-30	-40	-50	-60	-70	-80	-90
148	34°08'	63°22'	137	*		****	*****	****	*****	*****
154	34°33'	58°44'	26			***				
157	34°35'	60°56'	80	*****	*****	*****	*****			
166	34°49'	58°32'	20		***	*****	*****	*****	*****	*****
168	34°54'	60°00'	53		*		*	***		
173	35°01'	63°01'	117			***				
178	35°27'	60°53'	76	*****	*****	*	*	*****		
301	29°08'	59°16'	36	*****	*****	*****		*	*****	
309	29°11'	59°42'	53	*****	*****	*****	*****	*****	*****	
319	31°12'	57°55'	37	*		****	*	*****		
334	35°42'	63°45'	145				*	***	***	
346	29°41'	57°09'	70			*****	*****	*****	*****	*
399	32°52'	58°31'	14				*****	*	*	
416	27°05'	61°07'	102				*	***	***	
451	31°42'	60°49'	18				*****	*****	*****	
453	34°33'	60°55'	81				*	*****	*****	*
470	27°27'	58°46'	62					***	*****	
472	32°33'	60°51'	26				*	*****	*****	

Tabla 2.1. Continuación.

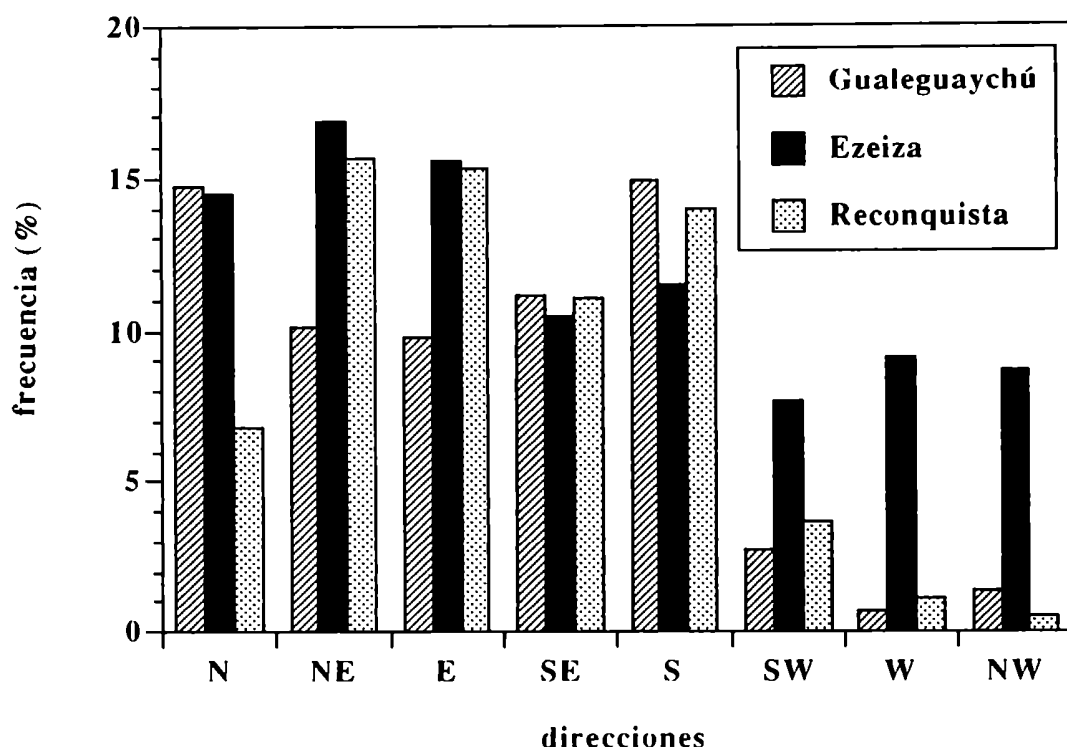


Figura 2.2. Frecuencia media anual de direcciones de viento en las estaciones Gualeguaychú Aero (Estación N°134), Ezeiza Aero (Estación N°166) y Reconquista Aero (Estación N°309), para el período 1981-90.

Para demostrar que las singularidades locales producidas por las distintas condiciones de superficie afectan los ciclos medios diarios y anuales de la temperatura, pero no introducen un efecto significativo en el promedio anual, en la Figura 2.3 se presenta el promedio del valor absoluto de las diferencias de temperatura media entre todos los pares de estaciones posibles en función de la distancia. Se encuentra que estas diferencias son nulas para distancias inferiores a los 50 km. Sin embargo, las diferencias calculadas utilizando las temperaturas máxima y mínima diarias no tienden a cero para distancias pequeñas (Figura 2.3a), lo que indicaría algún tipo de influencia local. Resultados similares se encuentran en

el análisis del ciclo anual, que puede ser representado a grandes rasgos por medio de las temperaturas medias de enero y julio (Figura 2.3b).

2.2.3. Verificación del modelo

Los dos puntos a estudiar son:

- ➡ que la temperatura media anual calculada con el modelo es suficiente para estimar este parámetro dentro de ciertos límites
- ➡ la cantidad mínima de información necesaria para aplicar el modelo y obtener estimaciones apropiadas

Es importante destacar el último punto, ya que impondrá el límite de aplicabilidad del modelo.

Para verificar el modelo se seleccionaron los cuatro años con mayor cantidad de información disponible. En estos años (1968, 1970, 1974 y 1975) existen por lo menos 24 estaciones con promedios anuales de temperatura. En la Tabla 2.2 se muestra la función obtenida para cada uno de los años, la varianza explicada (R^2) y el error cuadrático medio (ECM).

El error residual para cada estación es superior a 0.5°C en sólo el 2% de los casos. Estos pocos casos no parecerían tener una distribución geográfica particular y podrían deberse a errores de observación o digitalización, o a singularidades reales en el campo de temperatura.

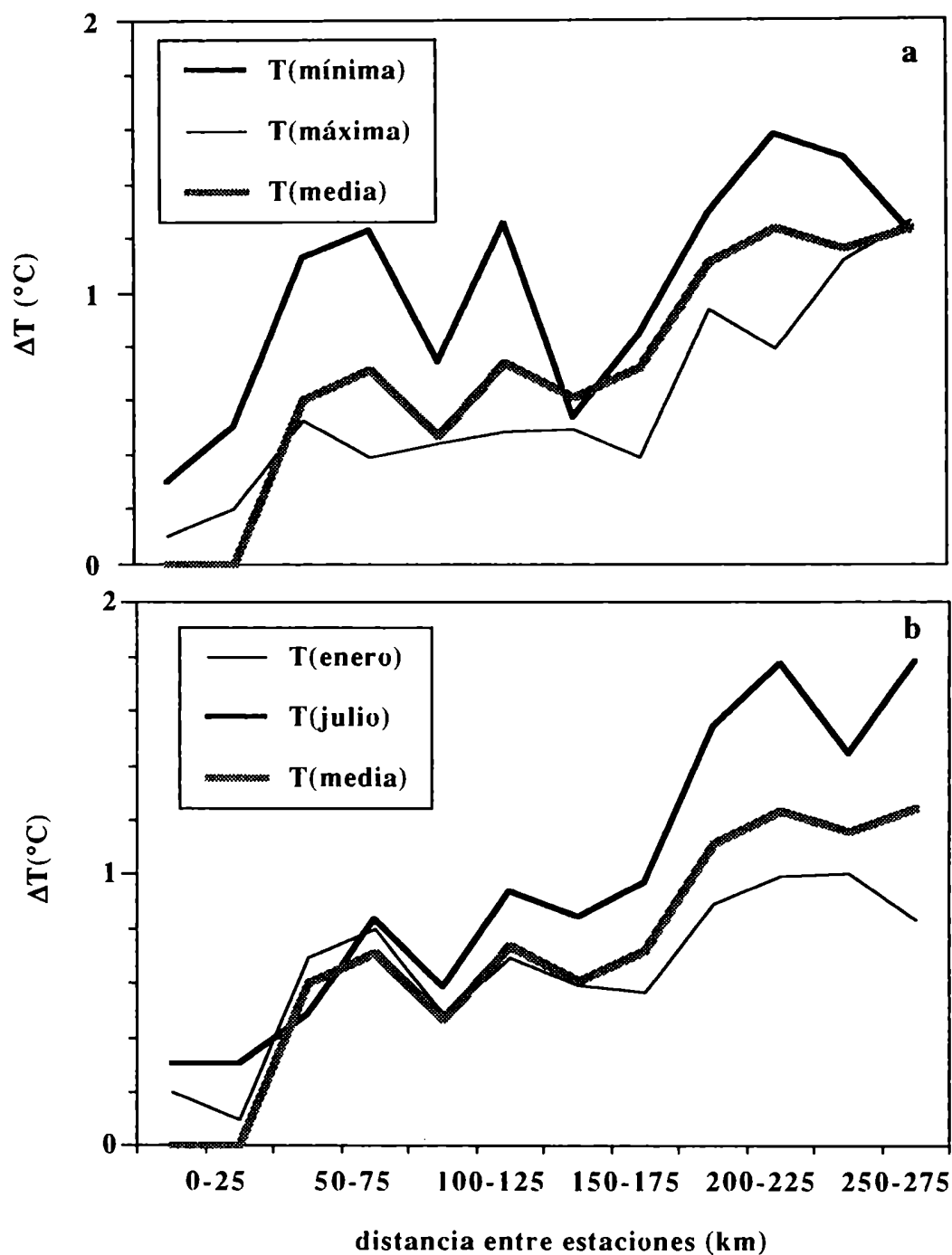


Figura 2.3. Diferencia de temperatura media entre todos los posibles pares de estaciones en función de la distancia entre sí. (a) diferencia entre temperaturas medias máxima y mínima y media diaria, (b) diferencia entre temperaturas medias de enero julio y media anual.

año	N	modelo (°C)	R ²	ECM(°C)	residuos (°C)											
1968	24	T = 15.70 + 6.36 LAT - 0.94 H - 0.27 (LON) ²	0.97	0.27	estación	34	67	81	82	87	98	108	109			
					residuo	-2	.1	-.1	-.2	.3	.2	.3	.3			
					estación	113	115	127	133	134	141	148	166			
					residuo	.4	-.3	.4	-.4	.1	-.1	.4	-.4			
					estación	309	319	399	416	451	470	472	453			
					residuo	-.1	.0	.2	-.1	-.3	.1	.1	-.4			
1970	24	T = 15.01 + 8.46 LAT - 1.26 (LAT) ²	0.99	0.23	estación	30	34	61	67	81	87	98	108			
					residuo	.4	-.2	-.4	.0	-.1	.2	-.2	.1			
					estación	109	113	114	127	133	134	148	166			
					residuo	.0	-.2	-.1	.3	-.3	.3	.1	.3			
					estación	301	309	319	416	451	470	472	453			
					residuo	.4	.1	.1	-.1	.0	-.1	-.4	-.2			
1974	26	T = 14.89 + 5.73 LAT - 0.37 LON - 1.05 H	0.95	0.36	estación	30	34	61	67	81	82	87	108	109		
					residuo	.1	-.2	-.4	.3	-.3	-.4	.3	.3	-.2		
					estación	113	114	115	127	133	134	141	148	166		
					residuo	-.1	.3	-.6	.3	-.5	-.1	-.2	-.1	-.3		
					estación	178	301	309	334	346	451	470	472			
					residuo	.5	.8	-.1	.5	.1	-.1	.3	-.4			

Tabla 2.2. Ajuste de los datos al modelo. N es el número de estaciones consideradas, R² es la varianza explicada y ECM es el error cuadrático medio.

año	N	modelo (°C)	R ²	ECM(°C)	residuos (°C)									
1975	24	T = 16.53 + 2.54 LAT - 0.61 LON + 2.77 (LAT) ²	0.97	0.29	estación	30	34	61	67	81	82	87	98	
					residuo	.4	-.2	-.4	.0	-.1	.2	-.2	.1	
					estación	113	114	115	133	134	141	148	166	
					residuo	.0	-.2	-.1	.3	-.3	.3	.1	.3	
					estación	178	309	334	346	451	453	470	472	
					residuo	.4	.1	.1	-.1	.0	-.1	-.4	-.2	

Tabla 2.2.Continuación.

Para verificar la capacidad del modelo para calcular la temperatura media anual en lugares en donde no se dispone de información, los datos de cada uno de los cuatro años fueron divididos en dos subgrupos: uno, utilizado como "predictor", es decir para seleccionar las variables del modelo y calcular los coeficientes, y el otro para verificar los resultados del modelo.

Se realizaron experimentos utilizando en primer lugar 16 estaciones como predictoras. Este número se fue reduciendo hasta que los resultados mostraron que más del 10% de los datos pronosticados tenían un error mayor a 0.6°C . La habilidad del modelo para estimar la temperatura media anual resultó satisfactoria hasta un mínimo de 8 estaciones predictoras. En la Tabla 2.3 se muestran los resultados de los experimentos realizados con 8 y 12 estaciones predictoras, para cada uno de los cuatro años utilizados en la verificación.

Como se observa en la Tabla 2.3, el modelo permite calcular la temperatura media anual con un error cuadrático medio igual o menor a 0.6°C en cualquier punto de la región de análisis, siempre y cuando el conjunto predictor esté definido por lo menos por 8 estaciones bien distribuidas geográficamente, tal como se presentan en los ejemplos de la Figura 2.4. No sólo el ECM resultó siempre menor a 0.6°C en cada uno de los 20 experimentos realizados, sino que los errores residuales individuales de cada ecuación de regresión fueron mayores que este valor en sólo el 10% de los casos.

Un mejor ajuste con errores menores se puede obtener prolongando el tiempo de promedio y de esta forma reduciendo la componente aleatoria de los errores. Por ejemplo, utilizando un período de promedio de 5 años en lugar de un año, los ECM se reducen a menos de 0.4°C y sólo el 6% de los casos simulados mostraron errores residuales mayores a 0.6°C . En la Tabla 2.4 se presentan los resultados para los períodos 1969-73 y 1974-78.

año	N	N _E	N _P	TEST	modelo(°C)	R ²	ECM _E (°C)	N ₁	ECM _P (°C)	N ₂
1968	24	12	12	A	T = 14.83 + 8.92 LAT - 2.40 (LAT) ²	0.98	0.22	-	0.42	1
		12	12	B	T = 15.53 + 6.30 LAT + 0.22 LON - 1.41 H	0.97	0.26	-	0.30	-
		8	16	C	T = 15.51 + 6.22 LAT - 1.17H + 0.11 (LON) ²	0.97	0.29	-	0.28	-
		8	16	D	T = 15.85 + 6.66 LAT - 2.23 H - 0.55 (LON) ²	0.98	0.23	-	0.43	1
		8	16	E	T = 15.43 + 6.53 LAT	0.99	0.12	-	0.49	3
1970	24	12	12	A	T = 15.39 + 7.05 LAT	0.99	0.21	-	0.30	-
		12	12	B	T = 14.90 + 8.91 LAT - 1.88 (LAT) ²	0.98	0.23	-	0.29	1
		8	16	C	T = 15.37 + 7.08 LAT	0.99	0.19	-	0.29	-
		8	16	D	T = 14.40 + 10.66 LAT - 2.96 (LAT) ²	0.99	0.16	-	0.31	-
		8	16	E	T = 15.50 + 6.57 LAT	0.98	0.22	-	0.31	1
1974	26	12	14	A	T = 15.74 + 5.71 LAT - 0.59 LON + 0.21 H	0.97	0.30	-	0.50	3
		12	14	B	T = 16.55 + 4.75 LAT - 1.23 LON - 0.20 (H) ²	0.96	0.29	-	0.54	3
		8	18	C	T = 15.48 + 5.95 LAT - 0.11 LON - 0.96 H	0.97	0.28	-	0.44	3
		8	18	D	T = 16.22 + 5.09 LAT - 1.48 LON + 1.85 H	0.97	0.17	-	0.45	2
		8	18	E	T = 16.34 + 5.18 LAT - 1.28 LON + 0.89 H	0.99	0.17	-	0.45	4
1975	24	12	12	A	T = 15.65 + 5.71 LAT + 0.23 (LON) ²	0.97	0.25	1	0.40	2
		12	12	B	T = 16.81 + 2.37 LAT - 0.90 LON + 2.39 (LAT) ²	0.97	0.24	-	0.43	1
		8	16	C	T = 15.52 + 6.32 LAT - 0.53 LON	0.96	0.25	-	0.46	2
		8	16	D	T = 16.32 + 2.73 LAT + 2.17 (LAT) ²	0.98	0.23	-	0.46	4
		8	16	E	T = 16.71 + 2.57 LAT - 0.99 LON + 3.06 (LAT) ²	0.98	0.21	-	0.39	1

Tabla 2.3. Verificación del modelo. N es el número de estaciones, N_E y N_P son el número de valores predictores y pronosticados en cada experimento, ECM_E y ECM_P son los errores cuadráticos medios de los valores predictores y pronosticados y N₁ y N₂ son el número de estaciones predictoras y pronosticadas con errores residuales mayores a 0.6°C.

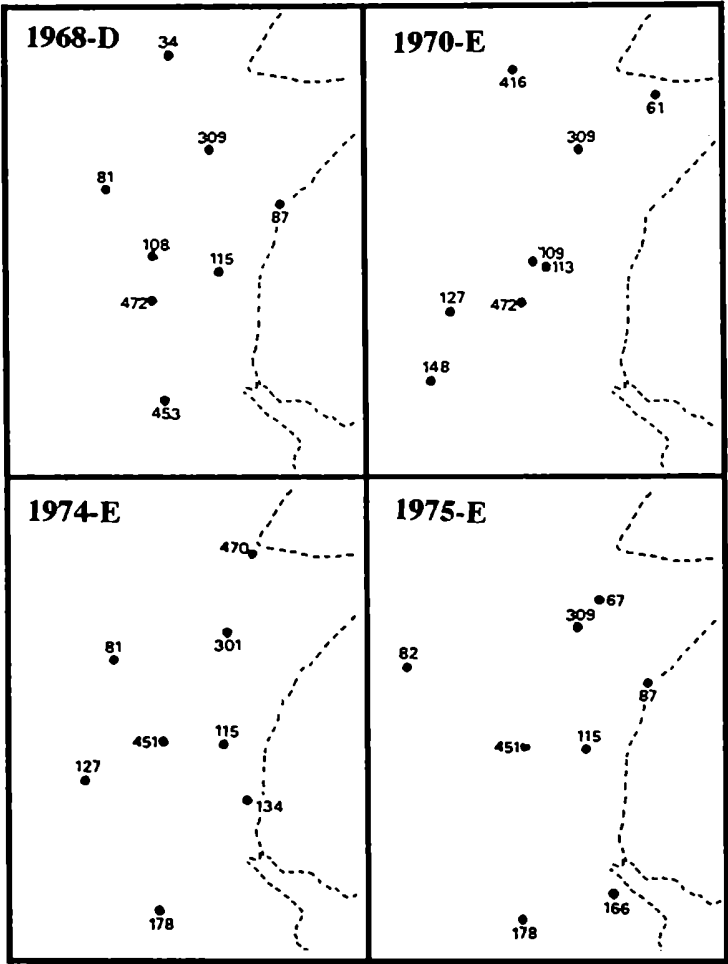


Figura 2.4. Ubicación de las estaciones utilizadas como predictoras en algunas de las simulaciones de verificación del modelo.

período	N	N _E	N _p	TEST	modelo(°C)	R ²	ECM _E (°C) N ₁	ECM _p (°C) N ₂
1969-73	21	12	9	A	T = 15.84 + 5.94 LAT - 0.72 (H) ²	0.97	0.27	0.28
		12	9	B	T = 15.99 + 5.55 LAT - 0.42 (H) ²	0.97	0.26	0.30
		8	13	C	T = 15.67 + 6.10 LAT - 1.44 H	0.99	0.23	0.35
		8	13	D	T = 16.54 + 5.19 LAT - 0.93 LON	0.98	0.21	0.37
1974-78	17	12	5	A	T = 15.82 + 5.84 LAT - 1.19 LON	0.98	0.24	0.28
		12	5	B	T = 15.58 + 6.34 LAT - 0.83 LON + 0.48 (LAT) ²	0.98	0.20	0.38
		8	9	C	T = 15.88 + 6.06LAT - 1.31 LON - 0.38 (H) ²	0.97	0.24	0.32
		8	9	D	T = 15.54 + 5.94 LAT - 0.62 LON	0.99	0.20	0.33

Tabla 2.4. Verificación del modelo. Idem Tabla 2.3, pero para los períodos 1969-73 y 1974-78.

En la Tabla 2.5 se presentan las ecuaciones del modelo de temperatura media anual y quinquenal obtenidas para la región de análisis para el período 1929-91. Asimismo se indica el número de estaciones predictoras utilizadas en cada caso (N) y la proporción de varianza explicada (R^2). Como era de esperar en casi todos los años analizados la variable que mayor proporción de varianza explica es la latitud (LAT). La única excepción es el año 1932 donde la variable más importante es la longitud (LON).

2.3. Estimación de la temperatura media regional

El modelo de temperatura media anual, ecuación (2.1), puede ser integrado para un área y rango de alturas particulares para calcular la temperatura media anual de esa región. Los errores en la temperatura media regional deberían ser inferiores a los de las localidades individuales ubicadas dentro de la región, debido a que el proceso de promedio debería eliminar parte de los errores debidos a singularidades locales reales y errores aleatorios.

La temperatura media regional "verdadera" no puede ser conocida exactamente, pero una buena estimación puede ser obtenida calculando el promedio aritmético en aquellos años en los que hay una cantidad de observaciones importante con una buena cobertura de la región. Por lo tanto, se calcularon las temperaturas medias anuales regionales en los mismos cuatro años utilizados para la verificación del modelo propuesto.

Los límites de integración se fijaron de acuerdo con el máximo espacio común determinado por las coordenadas geográficas y altura del conjunto de estaciones predictoras (Figura 2.5). Los límites de latitud están determinados por Corrientes (Estación N°54) y Junín Aero (estación N°453), los de longitud por Bella Vista INTA (Estación N°67) y Rafaela INTA (Estación N°98) y los de altura por Goya (Estación N°301) y Paraná INTA (Estación N°114).

Tabla 2.5. Ecuaciones del modelo de temperatura media anual y quinquenal válidas para la región indicada en la Figura 2.1 (período 1929-91).

año	N	modelo(°C)	R ²
1929	10	$T = 16.25 + 2.13 \text{ LAT} + 0.57 \text{ LON} + 4.30 (\text{LAT})^2$	0.98
1930	10	$T = 15.59 + 6.68 \text{ LAT} + 1.16 \text{ H}$	0.99
1931	11	$T = 16.42 + 0.21 \text{ LAT} - 1.70 \text{ LON} + 5.95 (\text{LAT})^2$	0.97
1932	12	$T = 17.89 - 2.05 \text{ LON} + 5.99 (\text{LAT})^2$	0.97
1933	11	$T = 16.88 + 3.19 \text{ LAT} - 2.10 \text{ LON} + 3.55 (\text{LAT})^2$	0.97
1929-33	8	$T = 13.71 + 7.68 \text{ LAT} + 2.20 \text{ LATxH}$	0.97
1934	16	$T = 21.12 + 9.74 \text{ LAT} - 4.19 \text{ LON} + 4.44 \text{ LATxLON}$	0.98
1935	15	$T = 16.17 + 2.41 \text{ LAT} - 1.28 \text{ H} + 4.77 (\text{LAT})^2$	0.99
1936	17	$T = 16.34 + 0.63 \text{ LAT} - 0.43 \text{ LON} - 0.82 \text{ H} + 6.24 (\text{LAT})^2$	0.99
1937	18	$T = 15.94 + 1.01 \text{ LAT} - 0.55 \text{ H} + 6.04 (\text{LAT})^2$	0.98
1938	18	$T = 16.73 - 0.16 \text{ LAT} + 6.30 (\text{LAT})^2 - 0.86 \text{ LONxH}$	0.99
1934-38	10	$T = 17.20 + 5.45 \text{ LAT} - 2.64 \text{ LATxH}$	0.97
1939	20	$T = 16.46 + 6.32 \text{ LAT} - 2.21 \text{ LON}$	0.98
1940	21	$T = 16.43 + 5.81 \text{ LAT} - 0.97 \text{ LON} - 0.60 (\text{LON})^2$	0.96
1941	20	$T = 16.19 + 2.70 \text{ LAT} - 1.59 \text{ LON} + 3.85 (\text{LAT})^2$	0.98
1942	21	$T = 18.48 + 5.16 \text{ LAT} - 3.77 \text{ LON} + 0.58 (\text{LAT})^2 + 1.19 (\text{LON})^2$	0.98
1943	22	$T = 19.30 + 5.45 \text{ LAT} - 3.68 \text{ LON} + 1.23 (\text{LON})^2$	0.97
1939-43	10	$T = 18.03 + 3.88 \text{ LAT} - 2.98 \text{ LATxH}$	0.97
1944	21	$T = 15.61 + 8.07 \text{ LAT} - 1.49 \text{ H}$	0.98
1945	23	$T = 15.91 + 6.45 \text{ LAT} + 0.72 (\text{LON})^2$	0.95
1946	20	$T = 15.30 + 2.90 \text{ LAT} + 3.58 (\text{LAT})^2 + 0.91 \text{ LONxH}$	0.98
1947	20	$T = 15.20 + 3.79 \text{ LAT} + 3.53 (\text{LAT})^2 + 0.40 \text{ LONxH}$	0.98
1948	18	$T = 15.30 + 5.45 \text{ LAT} + 2.23 (\text{LAT})^2 - 0.40 \text{ LONxH}$	0.99
1944-48	12	$T = 13.08 + 8.65 \text{ LAT} + 2.12 \text{ LATxH}$	0.99
1949	9	$T = 11.73 + 7.79 \text{ LAT} + 3.33 (\text{LAT})^2 + 4.61 \text{ LATxH}$	0.98
1950	9	$T = 10.86 + 7.54 \text{ LAT} + 3.76 (\text{LAT})^2 + 5.04 \text{ LATxH}$	0.96
1951	14	$T = 16.68 + 0.35 \text{ LAT} + 5.75 (\text{LAT})^2 + 0.56 (\text{H})^2$	0.97
1952	16	$T = 16.43 + 5.75 \text{ LAT} - 3.27 \text{ LON} + 2.15 (\text{H})^2 + 0.28 \text{ LATxLON}$	0.95
1953	14	$T = 13.77 + 8.36 \text{ LAT} + 2.22 \text{ LON} - 3.06 \text{ LATxLON}$	0.97
1949-53	9	$T = 16.08 + 4.47 \text{ LAT} + 2.93 (\text{LAT})^2 - 0.61 (\text{H})^2$	0.97
1954	14	$T = 16.11 + 7.01 \text{ LAT} - 0.84 \text{ LON} - 0.80 (\text{LAT})^2 - 0.73 \text{ LATxLON}$	0.97
1955	14	$T = 15.71 + 6.13 \text{ LAT} - 2.54 \text{ LON} + 27.09 \text{ H} - 14.49 (\text{H})^2$	0.99
1956	17	$T = 13.81 + 7.22 \text{ LAT} - 2.35 \text{ LON} + 2.02 \text{ LATxH}$	0.95
1957	20	$T = 16.33 + 7.31 \text{ LAT} + 1.36 \text{ LON} - 3.28 \text{ LONxH}$	0.95
1958	15	$T = 15.39 + 7.26 \text{ LAT} - 1.15 \text{ LON} + 0.97 \text{ LATxH}$	0.97
1954-58	9	$T = 16.32 + 6.93 \text{ LAT} - 1.66 \text{ LATxH}$	0.97

Tabla 2.5. Ecuaciones del modelo de temperatura media anual y quinquenal válidas para la región indicada en la Figura 2.1 (período 1929-91).

año	N	modelo(°C)	R ²
1959	16	$T = 14.59 + 10.77 \text{ LAT} - 1.80 \text{ LON} - 1.14 \text{ H} - 3.39 (\text{LAT})^2$	0.97
1960	14	$T = 19.18 + 2.71 \text{ LAT} + 2.36 \text{ LON} - 0.87 \text{ H} - 3.76 \text{ LATxLON}$	0.94
1961	16	$T = 19.64 + 4.01 \text{ LAT} + 0.64 \text{ LON} - 2.97 \text{ LATxLON} - 1.87 \text{ LATxH}$	0.99
1962	14	$T = 15.71 + 9.07 \text{ LAT} - 1.09 \text{ LON} - 3.82 (\text{LAT})^2 - 0.97 \text{ LATxH}$	0.99
1963	13	$T = 12.68 + 9.55 \text{ LAT} - 1.58 \text{ LON} - 1.99 \text{ H} + 2.95 \text{ LATxLON}$	0.98
1959-63	12	$T = 18.07 + 4.60 \text{ LAT} - 3.06 \text{ LATxH}$	0.98
1964	18	$T = 20.56 + 1.42 \text{ LAT} + 2.99 \text{ H} - 6.50 \text{ LATxH}$	0.98
1965	18	$T = 14.94 + 10.93 \text{ LAT} - 4.46 (\text{LAT})^2 - 0.62 \text{ LONxH}$	0.99
1966	17	$T = 15.15 + 6.37 \text{ LAT} - 0.44 \text{ LATxH}$	0.98
1967	14	$T = 21.58 + 2.32 \text{ LAT} - 0.08 \text{ LON} - 2.24 \text{ LATxLON} - 4.22 \text{ LATxH}$	0.98
1968	24	$T = 15.70 + 6.36 \text{ LAT} - 0.94 \text{ H} - 0.27 (\text{LON})^2$	0.97
1964-68	12	$T = 15.95 + 5.43 \text{ LAT} - 0.68 \text{ LATxH}$	0.98
1969	25	$T = 15.82 + 4.74 \text{ LAT} + 0.90 \text{ LON} - 0.96 \text{ H} + 1.43 (\text{LAT})^2$	0.97
1970	24	$T = 15.01 + 8.46 \text{ LAT} - 1.26 (\text{LAT})^2$	0.98
1971	25	$T = 15.05 + 6.83 \text{ LAT} + 1.18 (\text{LON})^2 - 1.92 \text{ LONxH}$	0.96
1972	28	$T = 15.28 + 6.36 \text{ LAT} - 1.17 \text{ LON} + 0.83 \text{ LATxLON}$	0.93
1973	22	$T = 15.99 + 4.92 \text{ LAT} - 1.43 \text{ LON} + 0.75 (\text{LAT})^2$	0.97
1969-73	21	$T = 18.60 + 3.44 \text{ LAT} - 2.93 \text{ LATxH}$	0.98
1974	26	$T = 15.89 + 5.73 \text{ LAT} - 0.37 \text{ LON} - 1.05 \text{ H}$	0.95
1975	24	$T = 16.53 + 2.54 \text{ LAT} - 0.61 \text{ LON} + 2.77 (\text{LAT})^2$	0.97
1976	20	$T = 15.52 + 4.04 \text{ LAT} - 0.87 \text{ LON} + 2.37 (\text{LAT})^2$	0.98
1977	19	$T = 15.84 + 6.80 \text{ LAT} - 1.00 \text{ LON} - 0.03 (\text{LAT})^2 - 0.20 (\text{LON})^2$	0.98
1978	18	$T = 16.62 + 4.36 \text{ LAT} - 1.18 \text{ LON} + 2.01 (\text{LAT})^2 - 1.10 \text{ LATxH}$	0.98
1974-78	17	$T = 15.00 + 6.53 \text{ LAT} + 0.02 \text{ LATxH}$	0.98
1979	19	$T = 15.97 + 6.07 \text{ LAT} - 1.75 \text{ LON} + 0.07 (\text{LAT})^2 - 0.15 \text{ LATxH}$	0.99
1980	17	$T = 16.67 + 7.28 \text{ LAT} - 1.53 \text{ LON} - 1.58 (\text{LAT})^2 - 0.52 \text{ LATxH}$	0.98
1981	20	$T = 17.19 + 5.72 \text{ LAT} + 1.76 \text{ LON} - 0.88 \text{ LATxH} - 3.41 \text{ LONxH}$	0.97
1982	17	$T = 20.79 + 3.22 \text{ LAT} + 4.43 \text{ LON} - 4.50 (\text{LON})^2 - 4.31 \text{ LATxH}$	0.98
1983	17	$T = 23.13 - 0.10 \text{ LAT} - 0.82 \text{ LON} - 7.82 \text{ LATxH}$	0.98
1979-83	11	$T = 24.11 - 1.15 \text{ LAT} - 8.51 \text{ LATxH}$	0.99
1984	13	$T = 26.23 - 1.84 \text{ LAT} + 3.79 \text{ LON} - 4.06 (\text{LON})^2 - 11.04 \text{ LATxH}$	0.99
1985	11	$T = 16.43 + 6.29 \text{ LAT} - 1.35 \text{ LON}$	0.99
1986	11	$T = 16.14 + 6.72 \text{ LAT} - 0.90 \text{ LON}$	0.99
1987	11	$T = 16.02 + 5.79 \text{ LAT} - 0.44 \text{ LON} - 0.84 (\text{H})^2$	0.97
1988	11	$T = 15.22 + 6.55 \text{ LAT} - 0.57 \text{ LON}$	0.99
1984-88	9	$T = 19.68 + 3.20 \text{ LAT} - 4.23 \text{ LATxH}$	0.98
1989	11	$T = 16.18 + 5.89 \text{ LAT} - 0.96 (\text{H})^2$	0.98
1990	11	$T = 16.62 + 2.75 \text{ LAT} - 0.90 \text{ LON} + 2.69 (\text{LAT})^2$	0.98
1991	10	$T = 16.57 + 6.24 \text{ LAT} - 1.67 \text{ LON} + 0.03 (\text{H})^2$	0.99

Tabla 2.5. Continuación.

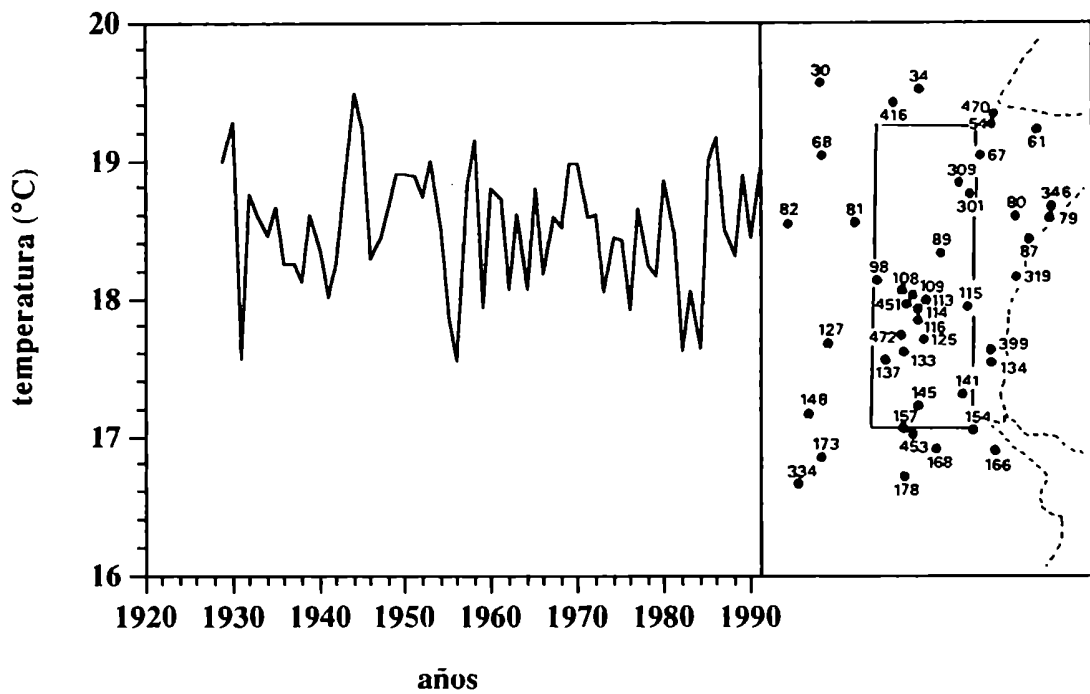


Figura 2.5. Temperatura media para la región indicada a la derecha, calculada por medio del modelo geográfico.

En la Tabla 2.6 se presenta la comparación entre los valores integrales calculados ($[T_{\text{modelo}}]$) y el promedio aritmético de todo el conjunto de estaciones con información disponible en la región ($[T]$). Se observa, con la única excepción del año 1974 (experimento E), que los errores son menores o iguales a 0.2°C , aún en los casos en que el conjunto predictor es de 8 estaciones. En estos casos el ECM es de sólo 0.03°C . En la Tabla 2.6 se incluye también el promedio aritmético de la temperatura para la región, para cada uno de los experimentos ($[T_{\text{promedio}}]$). Los errores son considerablemente mayores a los del modelo, indicando que es mejor construir series regionales de temperatura media anual a través de la integración de las ecuaciones del modelo.

año	TEST	[T](°C)	[T _{modelo}](°C)	[T _{promedio}](°C)
1968	A		18.6	17.9
	B		18.6	18.5
	C		18.5	18.7
	D		18.4	17.9
	E		18.4	18.3
		18.4		
1970	A		19.0	19.5
	B		18.9	18.0
	C		19.0	18.5
	D		19.0	18.7
	E		18.9	18.6
		18.9		
1974	A		18.4	18.1
	B		18.4	18.1
	C		18.3	17.8
	D		18.5	18.3
	E		18.6	18.6
		18.3		
1975	A		18.5	17.8
	B		18.4	18.1
	C		18.3	16.9
	D		18.4	17.6
	E		18.6	19.0
		18.4		

Tabla 2.6. Temperatura media regional estimada para la región indicada en la Figura 2.5. [T] es la temperatura media regional calculada con todas las estaciones disponibles en la región, [T_{modelo}] es la temperatura media regional calculada por medio de la integración del modelo y [T_{promedio}] es la temperatura media regional calculada con las estaciones utilizadas en cada experimento.

En la región considerada para este análisis, existen en el período 1929-1991, por lo menos 8 estaciones meteorológicas con información de temperatura media anual en cada año. Por lo tanto, la serie de temperatura media regional fue construida para ese período, por medio de la integración del modelo obtenido para cada año.

En la Figura 2.5 se presenta también la evolución de la temperatura media regional. Se observa una disminución de 0.5°C hasta la década del '70 y un aumento similar durante los últimos 20 años. Tanto la tendencia negativa hasta los años '70 como la posterior recuperación se encuentran en fase con lo hallado por Hoffmann (1990) para otras regiones del norte argentino.

2.4. Conclusiones

El modelo geográfico de temperatura media anual o quinquenal de superficie, basado en técnicas de análisis de regresión, es una herramienta útil para la simulación de series de temperatura locales o regionales en áreas con gradientes horizontales suaves de las propiedades de superficie.

Al aplicar el modelo en la región nordeste de Argentina, se encuentra que requiere poca información de entrada y puede ser utilizado hasta con un mínimo de 8 estaciones.

El modelo permite calcular la temperatura media anual de cualquier punto del área de análisis con un error cuadrático medio igual o menor a 0.6°C . En el caso de promedios quinquenales, este error se reduce a 0.4°C .

CAPITULO III

Estimación de la intensidad de la isla urbana de calor en la ciudad de Buenos Aires

Se aplica el modelo propuesto en el capítulo anterior para estimar la temperatura "rural" y la intensidad de la isla urbana de calor de la ciudad de Buenos Aires. Se discuten las posibles causas del comportamiento observado.

3.1. Características de la ciudad de Buenos Aires

Buenos Aires es una de las ciudades más grandes del mundo. Se encuentra sobre la costa occidental del Río de la Plata, que a la altura de la ciudad de Buenos Aires tiene aproximadamente 50 km de ancho. El suelo de la ciudad es relativamente llano con diferencias de nivel de no más de 30 metros.

Aunque el límite administrativo de la ciudad encierra un área de sólo 200 km² y una población aproximada de 3 millones de habitantes (INDEC, 1991), el área urbana se extiende hacia el llamado Gran Buenos Aires cubriendo una superficie total de 2000 km² y 10.9 millones de habitantes (INDEC, 1991).

En la Figura 3.1 se presenta la evolución de la población del Area Metropolitana para los años censales del período 1914-1991 (1914, 1947, 1960, 1970, 1980 y 1991). Se observa un crecimiento constante durante todo el período

con una aceleración a partir de la década del '40. Este comportamiento estaría asociado con la radicación de industrias en el Gran Buenos Aires desde esa fecha.

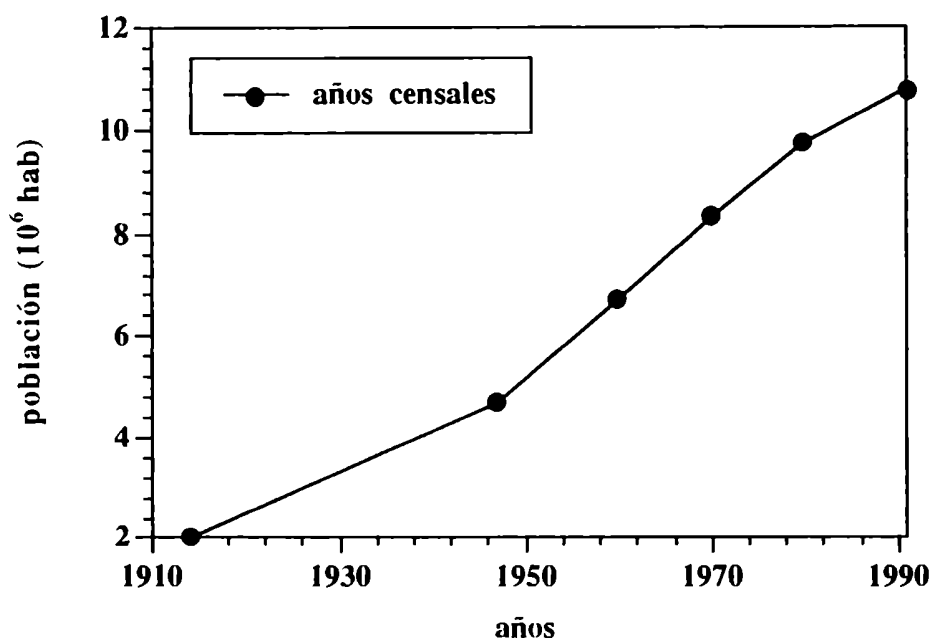


Figura 3.1. Evolución de la población de Buenos Aires y sus alrededores.

3.2. Información disponible para el estudio de la isla de calor de la ciudad de Buenos Aires

El efecto de isla urbana de calor en la ciudad de Buenos Aires fue estudiado por Rusticucci y Vargas (1991) considerando la información proveniente de la estación urbana Observatorio Central Buenos Aires y del aeropuerto internacional de Ezeiza, ubicado a 30 km al sudoeste de la ciudad.

El Observatorio Central (Estación N°156) se encuentra emplazado en un parque próximo a lo que podría considerarse como centro geográfico actual del área

metropolitana (Figura 3.2). Sin embargo, hasta la década del '30, esta estación estaba ubicada probablemente más cerca del borde del área urbana que del centro de la misma.

Los registros de la estación Ezeiza (Estación N°166) comienzan en 1947, lo que limita el estudio del efecto de isla urbana de calor a esa fecha. Otro inconveniente encontrado con los datos de Ezeiza es que la distancia entre esta estación y el límite de la ciudad se ha ido reduciendo continuamente desde 1947.

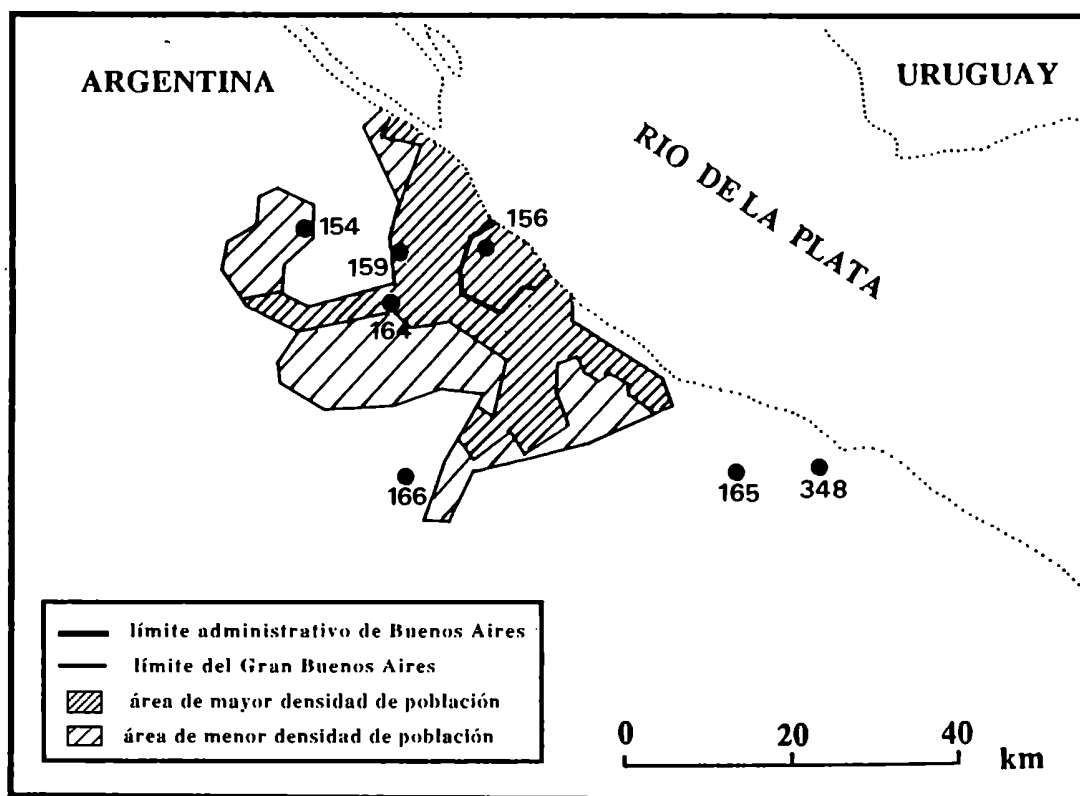


Figura 3.2. Buenos Aires y Gran Buenos Aires. Se indica la ubicación de la estaciones meteorológicas Observatorio Central Buenos Aires (156), San Miguel (154), El Palomar Aero (159), Morón Aero (164), Ezeiza Aero (166), Parque Pereyra Iraola (165) y Los Hornos (348).

Otras series de datos de estaciones próximas a Buenos Aires, como por ejemplo El Palomar (Estación N°159), Morón Aero (Estación N°164) y San Miguel (Estación N°154) tienen registros aún más cortos que los de Ezeiza y en la mayoría de los casos fueron alcanzadas por el crecimiento urbano, tal como se muestra en la Figura 3.2.

Es por estas razones que en este capítulo se presentan los resultados obtenidos al aplicar el modelo geográfico propuesto en el capítulo II para estimar la temperatura "rural" de la ciudad de Buenos Aires. Se comparan los resultados hallados con el modelo con los correspondientes a la utilización de Ezeiza como estación de referencia.

Es importante destacar que una de las ventajas de la utilización del modelo geográfico es que permite retrotraer el estudio de la intensidad media anual de la isla urbana de calor de Buenos Aires al año 1929, ya que de utilizar la estación Ezeiza el análisis podría comenzar recién en 1947.

3.3. Estimación de la temperatura "rural" de Buenos Aires

3.3.1. Análisis de la influencia del Río de la Plata sobre los promedios anuales de temperatura

Para analizar la posible influencia del Río de la Plata sobre la temperatura media anual de las estaciones consideradas en la region de análisis (Figura 2.2), se realizó la comparación entre los registros de estaciones no-urbanas cercanas a Buenos Aires y ubicadas a diferentes distancias de la costa (Figura 3.2). Las estaciones consideradas fueron Parque Pereyra Iraola (Estación N°165), Los Hornos (Estación N°348) y Ezeiza.

En la Tabla 3.1 se muestra que, mientras que hay diferencias significativas en el ciclo diario, la temperatura media anual es esencialmente la misma en las tres estaciones. De esta forma quedaría justificada la utilización del modelo geográfico para estudiar la evolución del efecto de isla urbana de calor sobre la temperatura media anual ya que el Río de la Plata no influye sobre estos valores.

Estación	hora	T _{verano}	T _{otoño}	T _{invierno}	T _{primavera}	T _{anual}
348	08	20.9	14.9	7.9	14.6	14.6
	14	25.9	20.1	13.3	18.8	19.5
	20	20.0	14.8	9.1	13.5	14.3
	diario	22.3	16.6	10.1	15.6	16.1
165	08	20.3	14.3	7.8	14.4	14.2
	14	25.6	20.4	13.4	19.0	19.6
	20	20.0	14.7	9.2	14.1	14.5
	diario	22.0	16.5	10.1	15.8	16.1
166	08	20.6	13.4	7.9	14.5	14.1
	14	26.2	20.5	13.7	18.9	19.8
	20	20.1	14.5	9.0	13.7	14.3
	diario	22.3	16.1	10.2	15.7	16.1

Tabla 3.1. Promedios estacionales y anual de temperatura (°C) a distintas horas y promedio diario para tres estaciones ubicadas a diferentes distancias de la costa del Río de la Plata: Los Hornos (348), Parque Pereyra Iraola (165) y Ezeiza Aero (166). La ubicación de las estaciones se muestra en la Figura 3.2.

3.3.2. Aplicación del modelo

A partir de las ecuaciones del modelo geográfico anual (Tabla 2.5) se construyó una serie de temperatura "rural" para la ciudad de Buenos Aires. Las coordenadas geográficas y elevación consideradas para la ciudad de Buenos Aires

fueron las correspondientes a la estación Observatorio Central Buenos Aires (lat=34°35'S, lon=58°29'W, h=25 m).

Las estimaciones obtenidas con el modelo utilizando promedios anuales o quinquenales son consistentes y no difieren en más de 0.2°C para un mismo período de 5 años, con un error standard de 0.04°C, tal como se muestra en la Tabla 3.2.

En la Figura 3.3 se muestran las temperaturas medias anuales de Buenos Aires y Ezeiza y la temperatura "rural" de Buenos Aires, calculada por medio del modelo, para el período 1929-91.

Los comportamientos similares que se observan entre las temperaturas de Ezeiza y "rural" de Buenos Aires, no se deben a la inclusión de Ezeiza como una de las estaciones pronosticadoras. Para cada uno de los años del período 1951-91 se dispone de información en por lo menos 11 estaciones meteorológicas y en algunos años esta cantidad de estaciones predictoras asciende a 20. Los parámetros del modelo muestran pequeños cambios cuando se incluye o excluye alguna de las estaciones en el conjunto pronosticador.

Mientras que la temperatura observada en Buenos Aires muestra una tendencia de 0.02°/año desde 1929 que explica el 55% de la varianza total, la serie construida con el modelo tiene una tendencia levemente negativa (-0.004°/año) y sin significancia estadística (explica sólo el 2% de la varianza total) en el mismo período.

En el período 1965-91 ha habido un calentamiento generalizado en la parte sur de la región indicada en la Figura 2.2. En los registros de las dos estaciones no-urbanas con información más completa, Rosario y Gualagaychú (Estaciones N°133 y 134), la tendencia encontrada es de 0.02°/año. Por otro lado, Ezeiza muestra para

el mismo período una tendencia de $0.04^{\circ}/\text{año}$, mientras que para el modelo la tendencia es de $0.02^{\circ}/\text{año}$.

La comparación entre las tendencias mencionadas demuestra el sospechado aumento de la influencia urbana sobre la temperatura de Ezeiza, debido a su proximidad a la ciudad. Por lo tanto, es conveniente utilizar el modelo para estimar la diferencia urbana-rural de la temperatura media anual aún después de 1947.

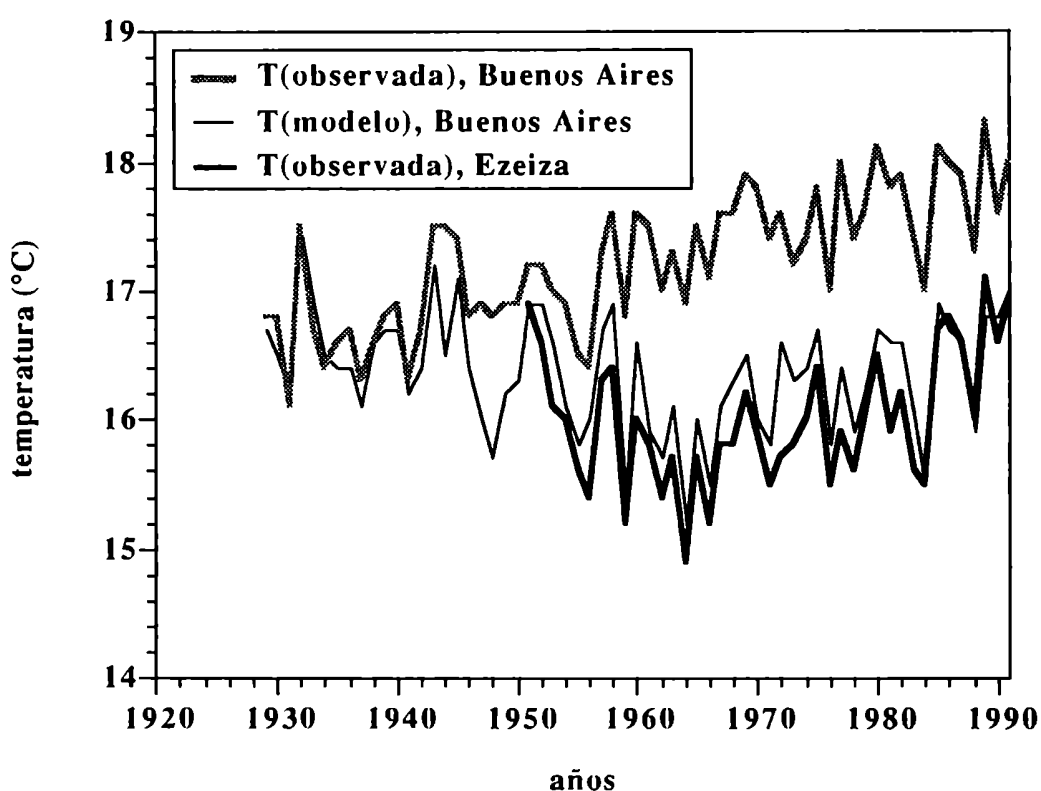


Figura 3.3. Evolución de la temperatura media anual observada y obtenida por medio del modelo geográfico para Buenos Aires y observada en la estación Ezeiza.

año	T_m	T_o	T^*_m
1929	16.7	16.8	
1930	16.5	16.8	
1931	16.2	16.1	
1932	17.5	17.5	
1933	16.9	16.7	
1929-33	$\bar{T}_m=16.8$	$\bar{T}_o=16.8$	16.6
1934	16.5	16.4	
1935	16.4	16.6	
1936	16.4	16.7	
1937	16.1	16.3	
1938	16.6	16.6	
1934-38	$\bar{T}_m=16.4$	$\bar{T}_o=16.5$	16.4
1939	16.7	16.8	
1940	16.7	16.9	
1941	16.2	16.3	
1942	16.4	16.7	
1943	17.2	17.5	
1939-43	$\bar{T}_m=16.6$	$\bar{T}_o=16.8$	16.6
1944	16.5	17.5	
1945	17.1	17.4	
1946	16.4	16.8	
1947	16.0	16.9	
1948	15.7	16.8	
1944-48	$\bar{T}_m=16.3$	$\bar{T}_o=17.1$	16.2
1949	16.2	16.9	
1950	16.3	16.9	
1951	16.9	17.2	
1952	16.9	17.2	
1953	16.6	17.0	
1949-53	$\bar{T}_m=16.6$	$\bar{T}_o=17.0$	16.6
1954	16.1	16.9	
1955	15.8	16.5	
1956	16.0	16.4	
1957	16.7	17.3	
1958	16.9	17.6	
1954-58	$\bar{T}_m=16.3$	$\bar{T}_o=16.9$	16.2

Tabla 3.2. Temperatura media anual de la ciudad de Buenos Aires (período 1929-88).
 T_m es la temperatura obtenida con el modelo anual, T_o es la temperatura observada en la estación Observatorio Central y T^*_m es la obtenida con el modelo de 5 años.

año	T_m	T_o	T^*_m
1959	15.4	16.8	
1960	16.6	17.6	
1961	15.9	17.5	
1962	15.7	17.0	
1963	16.1	17.3	
1959-63	$\bar{T}_m=15.9$	$\bar{T}_o=17.2$	15.9
1964	15.2	16.9	
1965	16.0	17.5	
1966	15.5	17.1	
1967	16.1	17.6	
1968	16.3	17.6	
1964-68	$\bar{T}_m=15.8$	$\bar{T}_o=17.3$	16.0
1969	16.5	17.9	
1970	16.0	17.8	
1971	15.8	17.4	
1972	16.6	17.6	
1973	16.3	17.2	
1969-73	$\bar{T}_m=16.2$	$\bar{T}_o=17.6$	16.4
1974	16.4	17.4	
1975	16.7	17.8	
1976	15.8	17.0	
1977	16.4	18.0	
1978	15.9	17.4	
1974-78	$\bar{T}_m=16.2$	$\bar{T}_o=17.5$	16.4
1979	16.2	17.6	
1980	16.7	18.1	
1981	16.6	17.8	
1982	16.6	17.9	
1983	16.0	17.4	
1979-83	$\bar{T}_m=16.4$	$\bar{T}_o=17.6$	16.4
1984	15.5	17.0	
1985	16.9	18.1	
1986	16.7	18.0	
1987	16.6	17.9	
1988	15.9	17.3	
1984-88	$\bar{T}_m=16.3$	$\bar{T}_o=17.7$	16.3

Tabla 3.2. Continuación.

3.4. Estimación de la isla urbana de calor de la ciudad de Buenos Aires

En la Figura 3.4 se presenta la diferencia entre las temperaturas medias anuales observada y obtenida a través del modelo para Buenos Aires, junto con el promedio móvil de 5 años de esta diferencia y la banda de error de 0.4°C debida a las limitaciones del modelo para pronosticar el promedio móvil de 5 años de la temperatura para un determinado lugar.

Pese a las diferentes tendencias, la concordancia general entre el modelo y Ezeiza a partir de 1947 indicaría que la incertidumbre es menor que la banda de error señalada en la Figura.

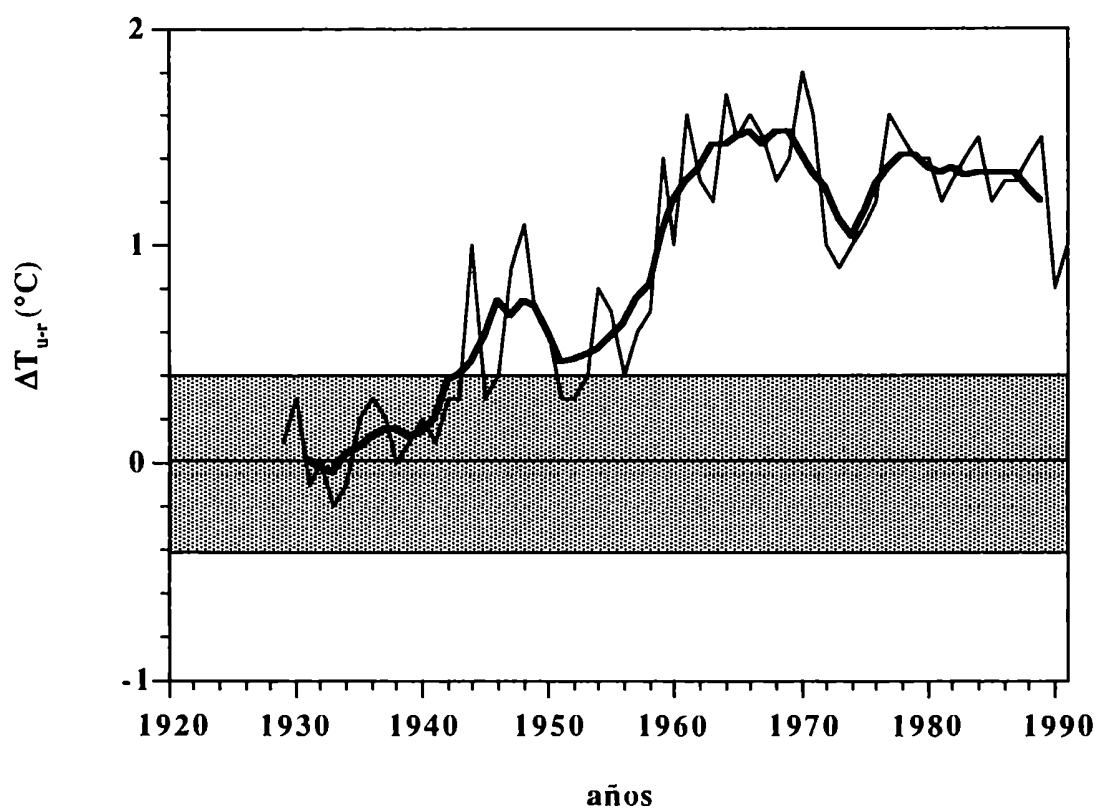


Figura 3.4. Evolución de la intensidad media anual de la isla urbana de calor de la ciudad de Buenos Aires.

En el período 1929-42, la diferencia se mantiene dentro de la banda de error y es menor de 0.3°C en la mayoría de los años. Una de las posibles razones de este valor bajo estaría en la posición relativa del Observatorio Central con respecto al área urbana, tal como se mencionó anteriormente.

La diferencia aumenta en el período 1942-60 en concordancia con el crecimiento industrial y la expansión poblacional. Entre 1960 y 1970 el efecto urbano se encuentra entre 1.0 y 1.5°C . Hacia mediados de la década del '60 se observa un cambio en la tendencia cuyas posibles causas serán discutidas en la próxima sección.

3.5. Análisis y posibles causas del cambio de tendencia en la intensidad de la isla urbana de calor de Buenos Aires a partir de mediados de la década del '60

3.5.1. Consideraciones generales sobre el Area Metropolitana

Una de las posibles causas de la disminución en la intensidad de la isla de calor de la ciudad de Buenos Aires a partir de mediados de la década del '60 podría estar en variaciones morfológicas en la costa del área metropolitana, que se hicieran notar a sotavento en la estación Observatorio Central Buenos Aires.

Con esta finalidad, en la Figura 3.5 se muestran los rosas de viento climatológicas de las estaciones urbanas Observatorio Central Buenos Aires y Aeroparque, para la décadas 1961-70, 1971-80 y 1981-90. Se observa que, para ambas estaciones, la dirección predominante es la correspondiente al sector N-E en las tres décadas.

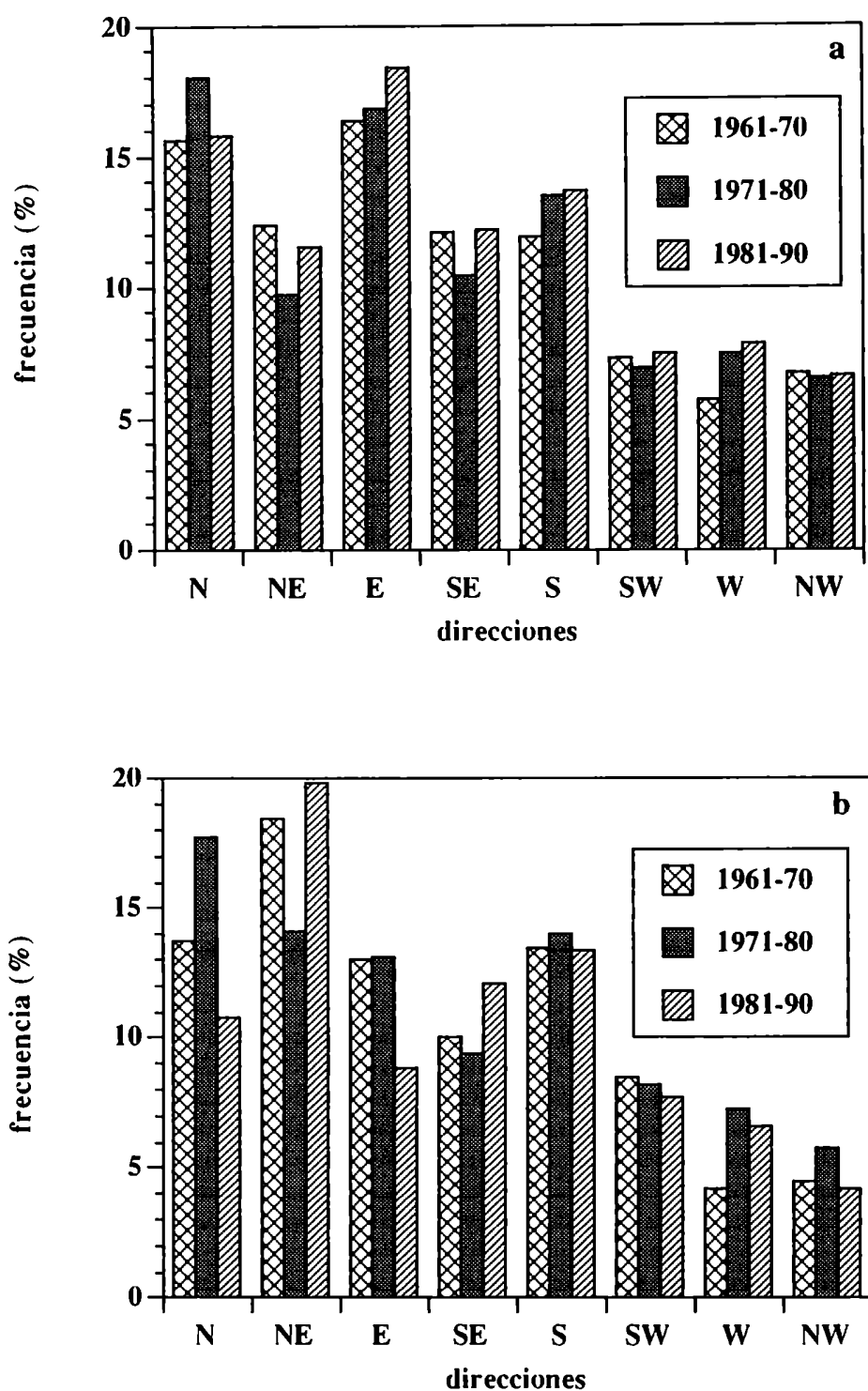


Figura 3.5. Frecuencia relativa (%) de direcciones de viento para las décadas 1961-70, 1971-80 y 1981-90 en las estaciones Aeroparque (a) y Observatorio Central Buenos Aires (b).

Sin embargo, si bien en los últimos años del período analizado se realizaron algunas nuevas construcciones sobre la costa del Río de la Plata, en especial en la zona denominada Costanera Norte, no parecerían ser las responsables del comportamiento observado en la temperatura del Observatorio Central, ya que con frecuencia esta estación se encuentra a barlovento de las nuevas edificaciones y esto debería evidenciarse en un aumento de la temperatura urbana y por lo tanto en una intensificación de la IUC, en lugar de un debilitamiento.

3.5.2. El impacto de la contaminación del aire

La capa de mezcla es la porción de la atmósfera sobre la superficie terrestre dentro de la cual ocurren movimientos convectivos, generalmente originados por el calentamiento radiativo superficial. Su espesor depende en gran medida del calor suministrado desde la superficie y de la estructura térmica inicial. Presenta una variación a lo largo del día, alcanzando valores máximos durante las horas de la tarde y mínimos durante la mañana. A nivel estacional, los valores extremos ocurren en el verano (máximos) e invierno (mínimos).

La altura de la capa de mezcla atmosférica es un parámetro de gran importancia ambiental ya que determina el volumen de aire en el que los contaminantes son diluidos al ingresar a la atmósfera. Por otra parte, la capacidad de la atmósfera de transportar y dispersar los contaminantes emitidos está determinada por el viento transporte, definido como la velocidad media del viento en la capa de mezcla.

Holzworth (1972) estableció que la capacidad de la atmósfera de diluir los contaminantes se encuentra reducida cuando la altura de la capa de mezcla es inferior a los 1500 m y el viento transporte es menor a 4 m/s. Si estas condiciones persisten durante más de 36 horas existe la posibilidad de ocurrencia de un episodio de contaminación severa.

Mazzeo y Gassmann (1991) analizaron la capacidad de autodepuración de la atmósfera en la Argentina considerando la información del período 1972-82. Encontraron que, de acuerdo con la definición de Holzworth (1972), la frecuencia anual de días de ocurrencia con baja capacidad de dilución atmosférica en la estación Ezeiza es de 15.4%. Asimismo, discriminaron este porcentaje según la cantidad de días consecutivos con riesgo de contaminación severa. Sus resultados indican que sólo en el 14% de los casos de capacidad de autodepuración disminuida, la duración del evento es de más de dos días.

Por lo tanto, si bien no existen registros prolongados sobre la calidad del aire de la ciudad de Buenos Aires y alrededores, los resultados obtenidos por Mazzeo y Gassmann (1991) indicarían que, al menos durante el período 1972-82, la contaminación no sería la responsable de la disminución de la intensidad de la isla de calor observada a partir mediados de la década del '60.

3.5.3. El efecto del calentamiento regional

La estabilidad atmosférica en las capas más próximas al suelo es mayor durante los procesos de enfriamiento, y en especial durante el enfriamiento radiativo nocturno. Las temperaturas mínimas ocurren cuando la estabilidad es muy pronunciada, mientras que las temperaturas máximas se observan después de varias horas de insolación y están asociadas a condiciones inestables, cuando el calor se disipa más fácilmente en la vertical. Sería esperable entonces que, en promedio, en latitudes medias y durante años relativamente cálidos exista una mayor frecuencia de condiciones inestables.

Por lo tanto, podría anticiparse una correlación negativa entre la intensidad media anual de la isla urbana de calor (ΔT_{u-r}) y la temperatura media anual del área rural, considerando que ésta última es representativa de las condiciones atmosféricas regionales.

Para testear esta hipótesis, se calcula la correlación lineal entre la isla urbana de calor de la ciudad de Buenos Aires y la temperatura rural, donde los datos de temperatura rural considerados son los obtenidos por medio del modelo geográfico para el período 1929-91.

Los efectos del crecimiento de la ciudad pueden ser filtrados de la diferencia ΔT_{u-r} por medio de una función lineal o a través de una función cuadrática más realista, cuyo máximo es alcanzado a mediados de la década del '60.

En la Tabla 3.3 se presentan los coeficientes de correlación hallados así como sus respectivos niveles de significancia. También se muestran los resultados obtenidos al considerar como estación de referencia a la estación Ezeiza (período 1951-91). En todos los casos los coeficientes son negativos y con altos niveles de significancia.

En la misma Tabla también se presentan los coeficientes de las regresiones lineales calculadas. Estos coeficientes permiten calcular la respuesta de la diferencia ΔT_{u-r} a cambios en la temperatura rural. En el período 1965-91, se encuentra que el calentamiento de la estación Ezeiza es de 1.1°C , mientras que en la serie de referencia construida con el modelo geográfico este valor se reduce a 0.6°C . Luego para estos calentamientos y tal como se muestra en la Tabla 3.3, la reducción del calentamiento urbano en la ciudad de Buenos Aires a causa del calentamiento regional es de por lo menos 0.2°C .

Por lo tanto, la tendencia positiva en las series de temperatura de zonas rurales, indicadora del posible calentamiento global que se estaría desarrollando, podría ser, en parte, responsable de la disminución en la intensidad de la isla urbana de calor de la ciudad de Buenos Aires a partir de mediados de la década del '60.

caso	R	nivel de significancia	coef. de regresión	reducción de ΔT (°C)
ΔT_{ur} vs. T(modelo)	-0.50	99	-0.41	0.2
ΔT_{ur} (tendencia lineal filtrada) vs. T(modelo)	-0.65	99	-0.49	0.3
ΔT_{ur} (tendencia cuadrática filtrada) vs. T(modelo)	-0.51	99	-0.28	0.2
ΔT_{ur} vs. T(Ezeiza)	-0.57	99	-0.44	0.5
ΔT_{ur} (tendencia lineal filtrada) vs. T(Ezeiza)	-0.68	99	-0.51	0.6
ΔT_{ur} (tendencia cuadrática filtrada) vs. T(Ezeiza)	-0.35	95	-0.13	0.1

Tabla 3.3. Coeficientes de correlación (R) y de regresión lineal entre la diferencia urbano-rural de temperatura media anual y la temperatura rural obtenida a través del modelo geográfico (1929-91) y observada en la estación Ezeiza (1951-91). Reducción de la diferencia urbano-rural debido al calentamiento rural.

En los capítulos V y VI se analizará si esta correlación negativa hallada entre la diferencia urbana-rural de la temperatura media anual para la ciudad de Buenos Aires y la temperatura rural se observa en otras partes del mundo. De ser así, el análisis de este efecto será importante en estudios de cuantificación del posible calentamiento global debido a que indicaría que el efecto urbano está siendo sobrestimado.

3.5.4. Cambios en la circulación a nivel regional

Las características del campo de presión se traducen en patrones de circulación del aire y determinan el comportamiento de variables como temperatura y precipitación. Entre los antecedentes más importantes sobre modificaciones en la circulación en la región sur de Sudamérica se encuentran los estudios realizados por Pittock (1980a, 1980b), donde analiza la relación entre la posición del anticiclón del Pacífico y las anomalías de temperatura y precipitación en Argentina y Chile.

Minetti y otros (1987) investigan también las fluctuaciones de la circulación en América del Sur y su relación con variaciones aperiódicas de la precipitación.

Con el objeto de discutir si la disminución de la intensidad de la isla urbana de calor a partir de mediados de la década del '60 podría estar asociada a cambios en la circulación del aire a nivel regional, se analiza la posición del máximo de presión del litoral atlántico y su relación con las temperaturas medias estacionales de la franja costera del sur de Sudamérica, entre Curitiba (Brasil) y Bahía Blanca (Argentina).

Normalmente, se presentan dos máximos de presión sobre la costa atlántica, siendo más intenso el que se encuentra al norte de Río de Janeiro (Minetti y Vargas, 1983). El máximo secundario se encuentra en latitudes que van desde Uruguay hasta el norte de la Patagonia y por lo tanto los cambios en su posición serán los más importantes para este análisis.

3.5.4.1. Información utilizada

Se utilizan los promedios mensuales de presión a nivel del mar en el período 1961-90, de 36 estaciones meteorológicas ubicadas en la franja litoral entre Río de Janeiro (22°54'S) y Comodoro Rivadavia (45°47'S). En la Tabla 3.4 se indican las estaciones consideradas.

Las estaciones meteorológicas argentinas corresponden a la red de observación del Servicio Meteorológico Nacional, mientras que la información proveniente de estaciones de Brasil y Uruguay pertenece a la base de datos del National Center for Atmospheric Research (Spangler and Jenne, 1992).

estación	latitud (S)	longitud (W)
Río de Janeiro	22°54'	43°11'
San Pablo	23°35'	46°53'
Iguape	24°41'	47°30'
Curitiba	25°24'	49°18'
Florianopolis	27°35'	48°36'
Porto Alegre	30°00'	51°11'
Treinta y Tres	33°06'	54°23'
San Jose	34°24'	56°42'
Rocha	34°30'	54°18'
Montevideo	34°48'	56°12'
Colonia	34°30'	57°53'
Punta del Este	35°00'	55°00'
Ezeiza	34°49'	58°32'
Parque Pereyra Iraola	34°52'	58°10'
La Plata Aero	34°58'	57°54'
Punta Indio BN	35°22'	57°17'
Dolores Aero	36°21'	57°44'
San Clemente del Tuyú	36°22'	56°43'
Pinamar	37°05'	56°51'
Mar del Plata Aero	37°56'	57°35'
Necochea Aero	38°29'	58°50'
Tres Arroyos	38°20'	60°15'
Bahía Blanca Aero	38°44'	62°10'
Comandante Espora BN	38°44'	62°10'
Faro El Rincón	39°23'	62°01'
Faro Segunda Barranca	40°47'	62°16'
Patagones	40°47'	63°01'
Hilario Ascasubi INTA	39°23'	62°37'
Viedma Aero	40°51'	63°01'
San Antonio Oeste Aero	40°44'	64°57'
Faro Punta Delgada	42°46'	63°38'
Puerto Madryn BN Aero	42°47'	65°30'
Trelew Aero	43°12'	65°16'
Cabo Raso	44°21'	65°14'
Camarones	44°49'	65°42'
Comodoro Rivadavia	45°47'	67°30'

Tabla 3.4. Estaciones meteorológicas consideradas para determinar la posición del máximo secundario de presión sobre la costa atlántica de Sudamérica.

3.5.4.2. Determinación de la posición del máximo secundario de presión sobre la costa atlántica de América del Sur

Para cada mes y año del período de análisis se ajustan las presiones medias mensuales (p) de las estaciones consideradas a funciones polinómicas de tercer grado de la latitud (lat) :

$$p = a (lat)^3 + b (lat)^2 + c lat + d \quad (3.1)$$

Por lo tanto, la posición del máximo secundario de presión para cada mes y año puede ser determinada analíticamente por medio de las curvas halladas.

En las Figuras 3.6 y 3.7 se presentan los resultados obtenidos que describen la evolución a nivel anual y estacional de la posición del máximo secundario de presión en el la costa atlántica sudamericana.

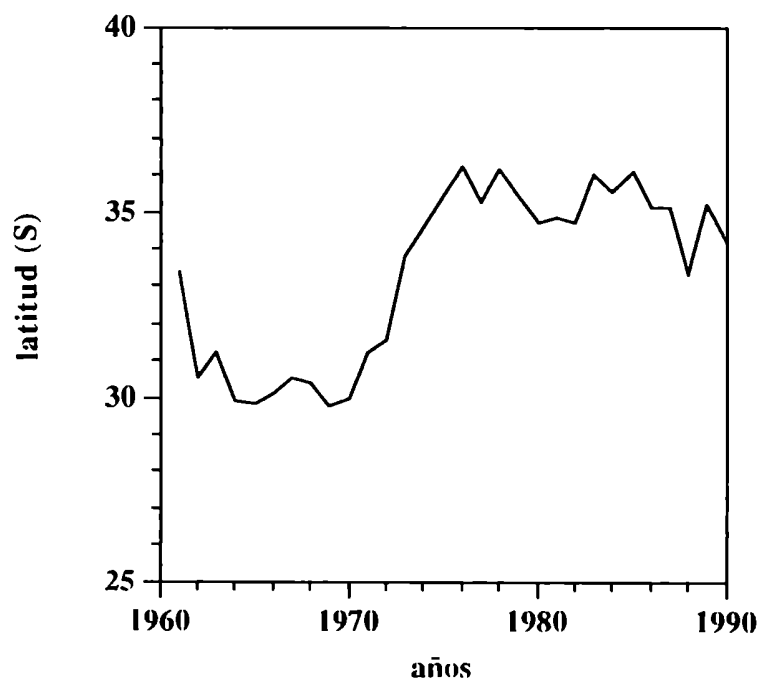


Figura 3.6. Evolución de la posición media anual del máximo secundario de presión ($Ip_{máx}$) sobre la costa atlántica de Sudamérica (1961-90).

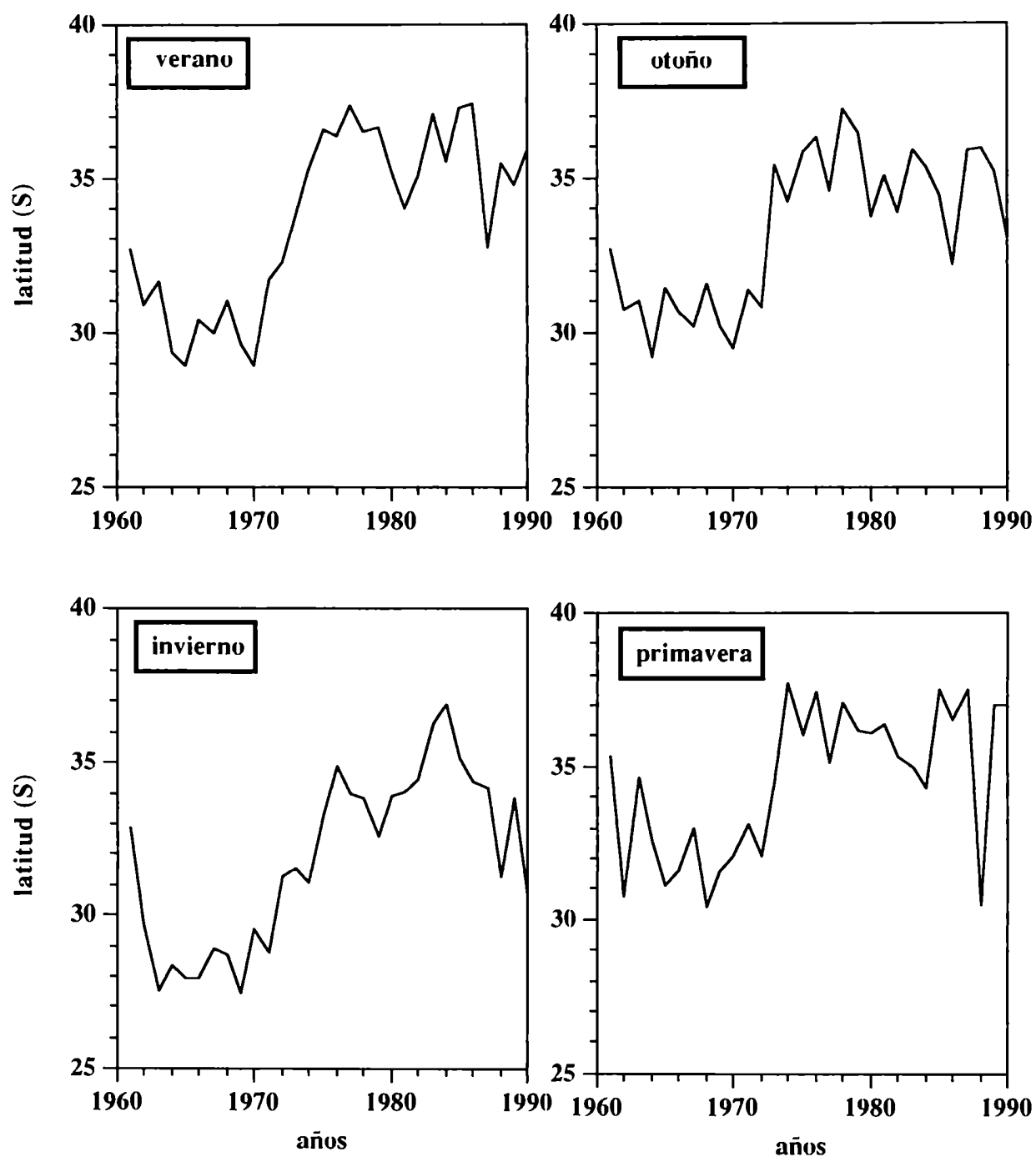


Figura 3.7. Evolución de la posición media estacional del máximo secundario de presión ($lp_{máx}$) sobre la costa atlántica de Sudamérica (1961-90).

A partir de las Figuras 3.6 y 3.7 se observa que el desplazamiento hacia el sur del máximo secundario de presión ($lp_{m\acute{a}x}$) se registra en forma especialmente marcada en el período 1969-76.

En la Tabla 3.5. se muestran las rectas de tendencia lineal de $lp_{m\acute{a}x}$ y el análisis de significancia por medio del test t de Student, de las pendientes halladas. En todos lo casos se observa una tendencia de desplazamiento hacia el sur que es altamente significativa (99%). Con respecto al comportamiento estacional, el corrimiento hacia el sur es más notorio durante el verano e invierno que en los equinoccios. A nivel anual, la tendencia hallada ($0.2^\circ/\text{año}$) implica un corrimiento neto hacia mayores latitudes del máximo secundario de presión de 6° .

período	recta de tendencia	N	nivel de significancia de la pendiente (%)
anual	$lp_{m\acute{a}x} = 0.20 \text{ año} - 358.5$	30	99
verano	$lp_{m\acute{a}x} = 0.24 \text{ año} - 436.4$	30	99
otoño	$lp_{m\acute{a}x} = 0.18 \text{ año} - 329.4$	30	99
invierno	$lp_{m\acute{a}x} = 0.23 \text{ año} - 416.6$	30	99
primavera	$lp_{m\acute{a}x} = 0.14 \text{ año} - 251.6$	30	99

Tabla 3.5. Rectas de tendencia lineal y posición del máximo secundario de presión ($lp_{m\acute{a}x}$) a nivel anual y estacional y significancia de las pendientes (período 1961-90).

Este cambio en la posición del anticiclón probablemente producirá cambios o fluctuaciones en la circulación y como consecuencia en la temperatura de la región, tal como se discutirá en la próxima sección.

3.5.4.3. La posición del máximo secundario de presión y su relación con la temperatura de superficie

En la Figura 3.8 se muestra el comportamiento de la intensidad de la IUC de la ciudad de Buenos Aires, tomando como datos de referencia los obtenidos con el modelo geográfico, en función de la posición del máximo secundario de presión sobre el litoral atlántico de Sudamérica para el período 1961-90. Se observa que existe una correspondencia entre el corrimiento hacia el sur del máximo secundario de presión y la disminución en la intensidad de la IUC. El coeficiente de correlación lineal entre la posición del máximo secundario de presión y el contraste térmico urbano-rural es de -0.31, con un nivel de significancia del 99%.

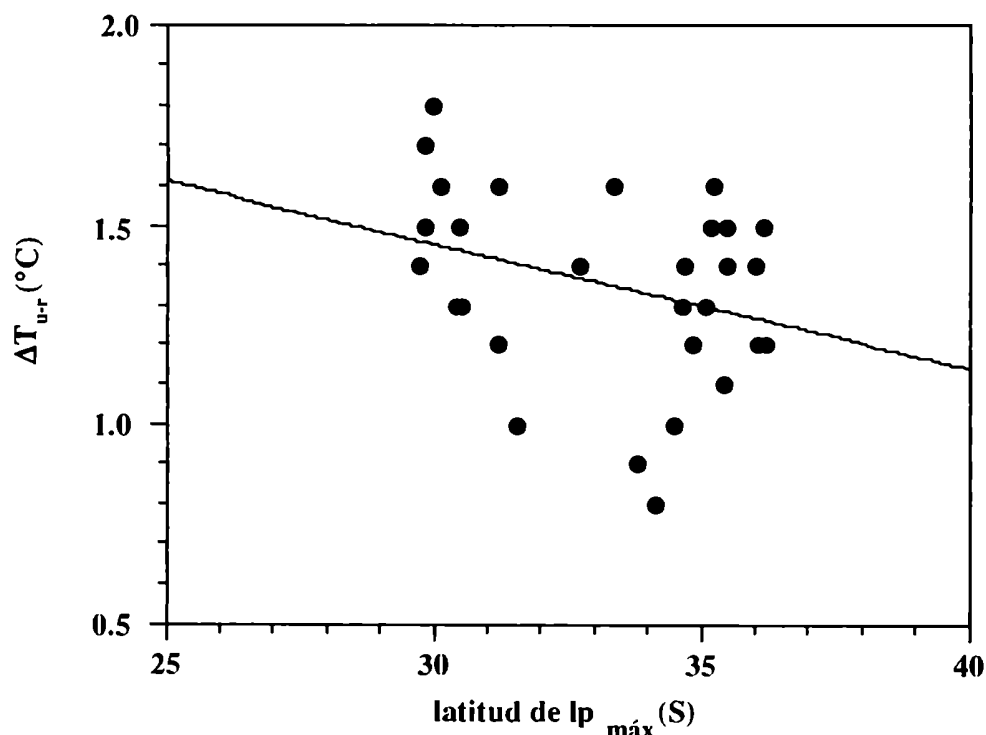


Figura 3.8. Comportamiento de la intensidad media anual de la isla urbana de calor (ΔT_{u-r}) de la ciudad de Buenos Aires en función de la posición del máximo secundario de presión sobre la costa atlántica de Sudamérica.

Por lo tanto, los cambios de circulación asociados al desplazamiento del máximo secundario de presión sobre el litoral atlántico hacia mayores latitudes podrían ser en parte responsables de la disminución del efecto urbano sobre la temperatura de la ciudad de Buenos Aires.

Este fenómeno tendría su explicación en la probable vinculación entre el comportamiento del anticiclón atlántico sobre el litoral de Sudamérica y los resultados hallados por Bischoff y Coronel (1990) respecto de la mayor frecuencia de ingreso de masas de aire cálidas y húmedas en las estaciones Resistencia, Córdoba y Ezeiza en el período 1968-82, tanto en verano como en invierno, en comparación con el período 1958-67.

Asimismo, el estudio de Duarte (1993) sobre las variaciones temporales de la temperatura de la tropósfera y baja estratósfera sobre la República Argentina en el período 1965-82, mostraría evidencias del desplazamiento hacia el sur del máximo secundario de la presión, ya que encuentra que a partir de 1969, la variabilidad interanual de la temperatura sobre Ezeiza se diferencia de la estación Comodoro Rivadavia y comienza a mostrar un régimen térmico similar al de la estación tropical Resistencia.

Por lo tanto, la relación entre el comportamiento del borde anticiclónico subtropical y su probable influencia sobre la temperatura de la región, podría ser una de las causas de la disminución de la intensidad media anual de la IUC de la ciudad de Buenos Aires, ya que, como se discutió en la sección 3.4.3 existe una correlación negativa entre calentamiento regional e intensidad de la IUC.

3.6. Conclusiones

Las estimaciones de la temperatura "rural" de Buenos Aires por medio del modelo geográfico propuesto en el capítulo II, permiten reemplazar a la estación

Ezeiza como estación rural de referencia para estimar el efecto urbano de la ciudad de Buenos Aires sobre la temperatura media anual. Esto es de considerable utilidad debido a la proximidad de Ezeiza al límite urbano del área metropolitana. Por otra parte, permite retrotraer el análisis de las diferencias urbano-rurales de la temperatura media anual de 1947 a 1929.

Desde mediados de la década del '60, la diferencia urbana-rural de temperatura no sólo no aumentó sino que muestra un suave decrecimiento. Debido a que la población del Area Metropolitana aumentó considerablemente en los últimos 30 años, la explicación para el comportamiento de la intensidad de la IUC debe encontrarse en un cambio de las condiciones meteorológicas o morfológicas de la ciudad.

Con el objeto de discutir las posibles causas del cambio de tendencia se analizaron cuatro factores: cambios en las características geográficas de la ciudad, el impacto de la contaminación del aire, el efecto del calentamiento regional y cambios en la circulación regional.

Entre estas posibles causas se encuentra que no existen variaciones importantes en la morfología de la ciudad, en especial en la franja costera que es la zona que se encuentra a barlovento de la estación urbana Observatorio Central Buenos Aires con mayor frecuencia anual. Tampoco la contaminación del aire parecería actuar como un factor determinante para la intensidad de la IUC.

Sin embargo, el desplazamiento hacia el sur de la posición del máximo secundario de presión sobre la costa atlántica de Sudamérica y sus consecuentes cambios en la circulación y en la temperatura de la región, así como el efecto del calentamiento regional que tiende a disminuir la IUC durante años relativamente más cálidos, son factores que podrían explicar el cambio de tendencia observado en la intensidad de la IUC a partir de mediados de la década del '60.

CAPITULO IV

Análisis de la tendencia de la temperatura en la región subtropical de Argentina: evaluación del efecto urbano

Se analiza la existencia de una componente urbana espúrea en las tendencias de temperatura de la región subtropical de Argentina obtenidas a través de una de las bases de datos más frecuentemente utilizadas en estudios de calentamiento global. Se propone un método de filtrado del efecto urbano en series de temperatura media anual de Argentina.

4.1. Introducción

En este capítulo se analiza la importancia de la componente urbana en la temperatura media anual de la región norcentral de Argentina y Chile y oeste de Uruguay que se indica en la Figura 4.1, obtenida a través de la base de datos producida por Jones y otros (1991).

Con esta finalidad, se propone un método a través del cual los efectos del crecimiento urbano en ciudades argentinas pueden ser filtrados de las series de temperatura y se calculan el promedio regional, de forma tal que la serie obtenida es

apta para ser utilizada en estudios de variabilidad climática en escala regional o hemisférica.

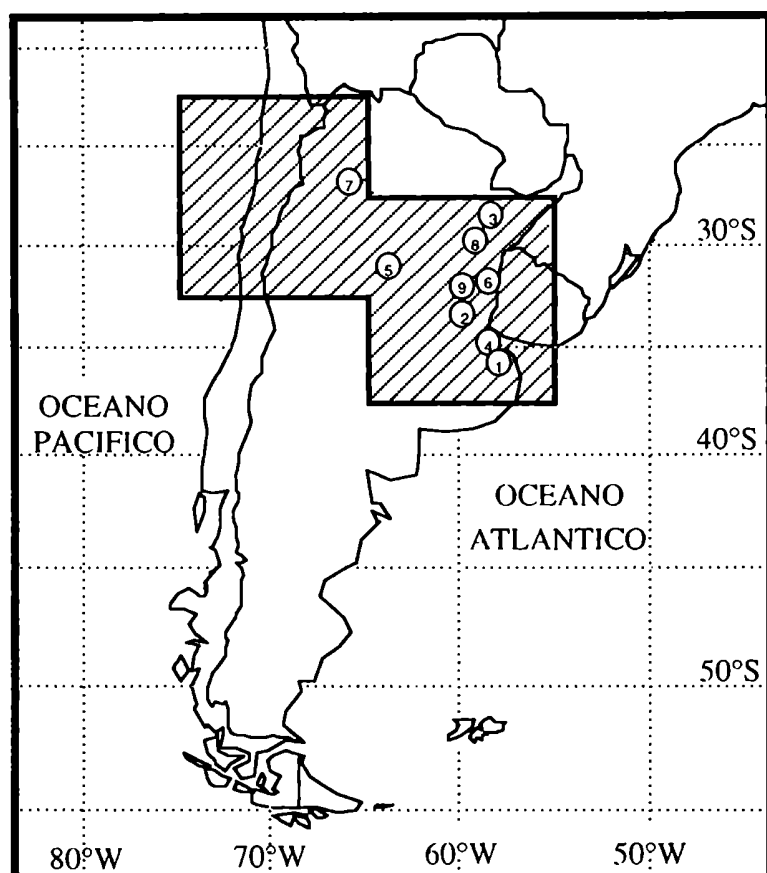


Figura 4.1. Area de trabajo. Se indican las ciudades listadas en la Tabla 4. 1:
1: La Plata, 2: Rosario, 3: Corrientes, 4: Buenos Aires, 5: Córdoba,
6: Concordia, 7: Tucumán, 8: Goya y 9: Santa Fe.

4.2. Diferencia urbana-rural de la temperatura media anual en función de la población

Como se discutió en el capítulo I, la isla urbana de calor (IUC) es un fenómeno físico con características internas asociadas a las variadas distribuciones y densidad de edificaciones de cada ciudad.

Uno de los mayores obstáculos en la cuantificación de la intensidad de la isla de calor en estudios climáticos de escala mayor a la urbana es que es prácticamente imposible parametrizar de forma apropiada el microclima de cada estación. Es por este motivo que diversos autores (Oke, 1973; Karl y otros, 1988) sugieren la utilización de la población como medida de la urbanización.

Si bien la población de la ciudad o área metropolitana no es un parámetro físico, es útil para representar el nivel de urbanización alcanzado alrededor de una estación meteorológica debido a que es un valor ampliamente documentado en la mayor parte de los países y a lo largo del último siglo, aún en ciudades extremadamente pequeñas.

En varios trabajos se cuantifican distintos aspectos de la diferencia máxima instantánea de temperatura entre pares de estaciones urbano-rurales en función de la población (Oke, 1973; Landsberg, 1975; Oke, 1979; Landsberg, 1981; Oke, 1982; WMO, 1986). Sin embargo, los resultados presentados son difíciles de relacionar con las diferencias entre las temperaturas medias anuales o estacionales.

En este análisis se consideran pares de estaciones urbano-rurales en la Argentina y se analizan las diferencias de la temperatura media anual en función de la población. Los resultados obtenidos son comparados con los hallados para ciudades de Estados Unidos y Australia.

4.2.1. Información utilizada

En la Tabla 4.1 se presentan los nueve pares de estaciones argentinas considerados, así como los períodos con información disponible. Todas las estaciones meteorológicas consideradas corresponden a la red del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y la clasificación de las estaciones en "urbanas" o "rurales" fue realizada de acuerdo con la documentación existente en los Departamentos de Estaciones y Climatología del SMN y en los casos en los que esta información no estaba disponible, mediante una encuesta realizada con inspectores de estaciones.

ciudad	estación urbana	estación rural	período
La Plata	La Plata Observatorio	La Plata Aero	1968-84
Rosario	Rosario	Rosario (*)	1934-48
Corrientes	Corrientes	Corrientes(*)	1934-61
	Corrientes Aero	"	1962-88
Buenos Aires	Buenos Aires Observatorio	Buenos Aires (*)	1929-50
	Ezeiza Aero	"	1951-91
Córdoba	Córdoba Observatorio	Córdoba Aero	1951-91
Concordia	Concordia	Concordia (*)	1934-64
Tucumán	Tucumán Aero	Tucumán Observatorio	1957-75
Goya	Goya	Goya (*)	1929-76
Santa Fe	Inmaculada Concepción	Santa Fe (*)	1955-57
	"	Sauce Viejo Aero	1959-66

Tabla 4.1. Pares de estaciones urbano-rurales ((*) significa que se utilizó el modelo geográfico para calcular la temperatura rural de la ciudad).

Excepto Tucumán Observatorio (período 1957-75), todas las estaciones "rurales" corresponden a aeropuertos ubicados en las afueras de las ciudades. En los casos en los que no se dispone de una estación rural próxima a la estación urbana, la temperatura "rural" de la ciudad fue reconstruida de acuerdo con el método propuesto en el capítulo II, siempre que la ciudad se encuentre emplazada dentro del área donde tiene validez el modelo.

4.2.2. Regresión entre la intensidad media anual de la IUC y la población

La intensidad media anual de la isla urbana de calor (ΔT_{u-r}) fue calculada para las nueve ciudades enumeradas en la Tabla 4.1 para los años censales 1947, 1960, 1970, 1980 y 1991 (INDEC, 1991) en los que se encuentra información disponible. Se obtuvieron 16 pares de estaciones y si bien existen datos del par Buenos Aires-Ezeiza para los años 1980 y 1991, no fueron considerados para la regresión debido a que la población de Buenos Aires en esos años es muy superior a la de las otras ciudades estudiadas y podría desviar los resultados.

Karl y otros (1988) encuentran que el efecto urbano es detectable en ciudades Estados Unidos cuando la población es superior a los 2000 habitantes. Proponen una relación exponencial entre ΔT_{u-r} y la población (POB) de la forma:

$$\Delta T_{u-r} = a (POB)^b \quad (4.1)$$

En la Tabla 4.2. se presentan los valores de los parámetros a y b , del coeficiente de correlación R , la cantidad de datos utilizados N para ajustar la ecuación (4.1) y el rango de población en la que tiene validez la ecuación propuesta, para ciudades argentinas. Asimismo, se comparan los resultados obtenidos con los

hallados por Karl y otros (1988) y por Coughlan y otros (1989) al aplicar el modelo (4.1) a ciudades de Estados Unidos y Australia, respectivamente.

Se encuentra que la correlación obtenida en ciudades argentinas es mayor que la encontrada en Australia y Estados Unidos, aunque el nivel de significancia de los coeficientes de correlación es del 99% en los tres casos.

país	a	b	R	N	rango de población
Argentina	0.00378	0.38	0.91	16	20000<POB<8350000
Estados Unidos	0.00182	0.45	0.57	414	POB>2000
Australia	0.01130	0.30	0.78	17	115000<POB<3300000

Tabla 4.2. Coeficientes a y b de la ecuación (4.1), coeficiente de correlación (R), cantidad de datos utilizados en el cálculo de los coeficientes (N) y rango de población para los que son válidos los coeficientes.

En la Figura 4.2 se muestra la curva de ajuste propuesta para ΔT_{u-r} en función de la población para la ciudades argentinas. Asimismo, se presentan las regresiones para ciudades de Estados Unidos y Australia y su comparación con la obtenida para Argentina.

Se encuentra que el calentamiento urbano en Estados Unidos es mayor que en Argentina para idénticas poblaciones y en todo el rango analizado. Esto probablemente estaría vinculado con el mayor consumo de energía por habitante asociado al mayor desarrollo económico de Estados Unidos y a diferencias en las características de las construcciones.

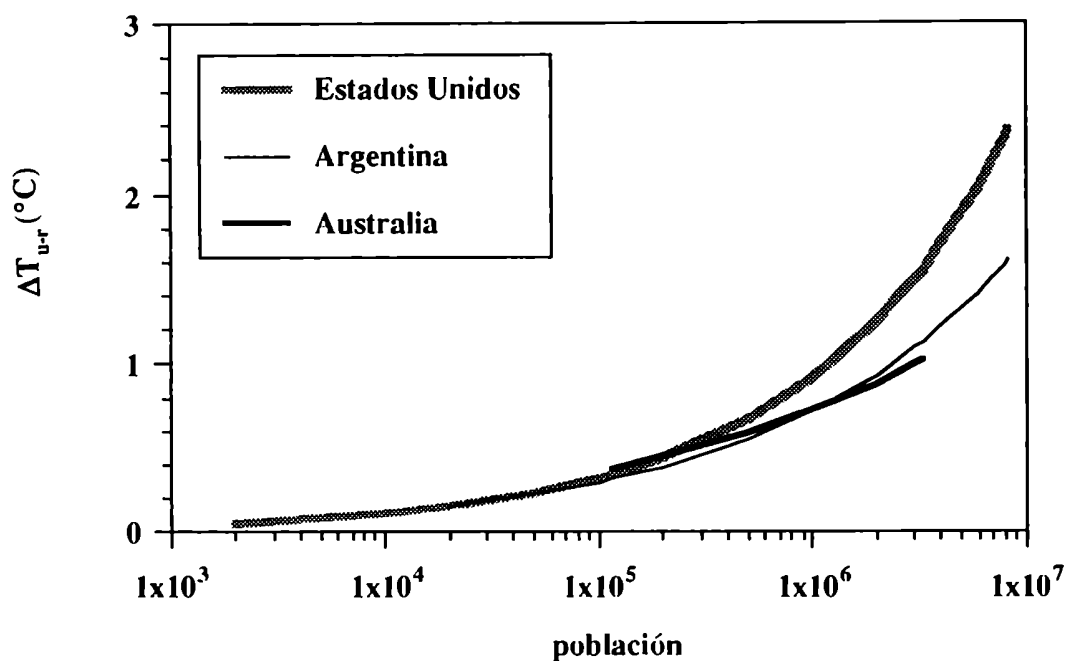


Figura 4.2. Curvas de ajuste de la diferencia urbana-rural de temperatura media anual (ΔT_{u-r}) en función de la población para ciudades de Argentina, Australia y Estados Unidos.

Con respecto a Australia, muestra valores inferiores a los de Estados Unidos en todo el rango y levemente superiores a los de Argentina para poblaciones menores a un millón de habitantes. Esta relación se invierte en ciudades más populosas.

La similitud entre las curvas de ajuste de Argentina y Australia se debería a que ambas regiones están sometidas a regímenes climáticos similares y por lo tanto responderían de la misma forma a perturbaciones externas semejantes.

4.3. Corrección de tendencias regionales obtenidas a partir de la base de datos de Jones y otros (1991)

4.3.1. Descripción de la base de datos de Jones y otros (1991)

La base de datos conformada por Jones y otros (1991) para el hemisferio sur, tiene como fuente primordial los World Weather Records (Smithsonian Institution, 1927, 1934, 1947, and U.S. Weather Bureau, 1959-82). Fue construida a partir de información de temperaturas medias mensuales de 610 estaciones entre 2.5°S y 62.5°S que fueron sometidas a un análisis de homogeneidad mediante la comparación de los datos entre estaciones próximas.

De las 610 estaciones disponibles, sólo pudo ser chequeada la calidad del 54% de ellas. En el estudio de homogeneidad se eliminaron para análisis posteriores únicamente tres estaciones en las que se identificó calentamiento urbano: San Pablo (Brasil), Madang (Nueva Guinea) y Whenupai (suburbio de Auckland, Nueva Zelanda).

El método de análisis de homogeneidad utilizado por Jones y otros (1991) no permite separar los efectos de las islas de calor cuando la mayoría de las estaciones de la región son precisamente urbanas. Es obvio que una ciudad como Buenos Aires debe tener un efecto urbano apreciable en la temperatura así como también un alto porcentaje de las estaciones de la región, lo que no es tenido en cuenta en el trabajo citado.

En la base de datos sólo 293 estaciones fueron incluídas y consideradas aptas para crear una grilla de anomalías de temperatura para análisis climáticos del hemisferio sur, en contraposición con el estudio equivalente para el hemisferio norte donde Jones y otros (1991) dispusieron de información confiable de 1584 estaciones.

Por otra parte, debido a la distribución irregular de las estaciones y para poder calcular promedios espaciales a escala regional o hemisférica, los datos fueron interpolados a puntos de grilla. Con esta finalidad las temperaturas de cada estación fueron reducidas a anomalías respecto del período 1951-70, elegido por ser el que mayor cantidad de estaciones con información disponible presenta. Las anomalías permiten eliminar las diferencias de elevación entre estaciones y dan mayor representatividad a los promedios espaciales a calcular a partir de ellas.

La grilla elegida para el diseño de esta base de datos es de 5° de latitud por 10° de longitud y abarca la franja entre 5°S y 60°S y el período 1851-1990. Las anomalías en cada punto (T_{gJ}) fueron calculadas promediando todas las estaciones cercanas al punto y utilizando como peso la inversa de la distancia entre sí:

$$T_{gJ} = \frac{\sum_{s=1}^N \alpha_s T_s}{\sum_{s=1}^N \alpha_s} \quad (4.2)$$

donde T_g es la anomalía de temperatura en el punto de grilla, T_s es la anomalía de temperatura en la estación s y α_s es la inversa de la distancia entre la estación s y el punto de grilla ($s=1,N$).

El número de estaciones (N) considerado para cada punto de grilla es variable, aunque cada estación fue utilizada una única vez, asociada al punto más próximo. Evidentemente en las regiones con poca información ésta no parecería ser la técnica más apropiada por cuanto arbitrariamente algunas estaciones reciben más peso que otras. Sin embargo, y debido a que en el Cono Sur al este de los Andes predomina una geografía de llanuras, la variación espacial de la temperatura es moderada por lo que, como se observará luego, esta metodología no introduce mucho error.

4.3.2. Identificación y corrección de estaciones con componente urbana

En la región representada en la Figura 4.1, Jones y otros (1991) disponen de información en 31 estaciones, de las cuales 27 pertenecen a Argentina, 2 a Chile y 2 a Uruguay. A partir del minucioso relevamiento realizado en el Servicio Meteorológico Nacional, ya comentado, se encuentra que 16 estaciones argentinas de las utilizadas estuvieron o están emplazadas dentro de ambientes urbanos. En la Tabla 4.3 se presenta una lista de estas estaciones y el período en que deben ser consideradas "urbanas".

La irregularidad de la zona elegida para este estudio se debe a que los puntos de grilla ($25^{\circ}\text{S}, 60^{\circ}\text{W}$) y ($35^{\circ}\text{S}, 70^{\circ}\text{W}$) no son considerados ya que incluyen información de pocas estaciones, entre las que se encuentran Asunción (Paraguay), Santiago de Chile (Chile) y otras ciudades. Es altamente probable que estas estaciones estén afectadas por calentamiento urbano en parte de su registro y no se dispone de la información necesaria para aplicar las correcciones que corresponderían.

Si bien una proporción importante de las 31 estaciones consideradas en la región comenzaron a funcionar hace más de un siglo, presentan gran cantidad de interrupciones que hacen que el análisis presentado en esta Tesis se limite al período 1895-1988.

A partir de la ecuación (4.1) y considerando los parámetros hallados para Argentina (ver Tabla 4.2), se calculan las correcciones a aplicar a las 16 estaciones enumeradas en la Tabla 4.3. Los datos de población de cada una de las ciudades fueron extraídos de los Censos Nacionales de Población y de estimaciones intercensales (INDEC, 1991).

estación	período "urbano"
Río Cuarto	1875-1953
Rosario	1875-1951
Pehuajó	1946-1959
Junín	1901-1958
Observatorio Central Buenos Aires	1856-
Santa Rosa	1910-1951
Corrientes	1873-1969
Goya	1876-1976
Paso de los Libres	1900-1962
Córdoba Observatorio	1872-
Pilar	1907-
Concordia	1875-1964
Catamarca	1875-1946
San Juan	1871-1947
Salta	1873-1949
Tucumán Aero	1951-1981

Tabla 4.3. Períodos en los que las estaciones meteorológicas enumeradas deben ser consideradas "urbanas". (Cuando no hay fecha límite debe considerarse que continúan en ambientes urbanos hasta la fecha).

Una vez corregidas las series de las estaciones "urbanas" para convertirlas en "rurales" y por lo tanto en aptas para estudios climáticos, se calculan las anomalías en cada estación tomando como referencia el período 1951-70. Las anomalías en cada punto de grilla (T'_{gu}) se obtienen interpolando según la ecuación (4.2).

Otra forma de realizar esta interpolación es realizar un promedio sin utilizar pesos por distancia, ya que la anomalía en cada punto de grilla no representa un

valor puntual (como sería el resultante de un análisis objetivo) sino el valor promedio para el área representativa del punto de grilla de 5° de latitud por 10° de longitud. De esta forma se obtiene un tercer valor de anomalías para cada punto de grilla (T_{gu}).

4.3.3. *Temperatura media regional*

Considerando los cuatro puntos de grilla que están incluídos en el área de análisis indicada en la Figura 4.1, es posible calcular la temperatura media regional $[T]$ mediante la fórmula propuesta por Jones y otros (1986b):

$$[T] = \frac{\sum_{g=1}^4 T_g \cos (LAT_g)}{\sum_{g=1}^4 \cos (LAT_g)} \quad (4.3)$$

donde T_g es la anomalía de temperatura y LAT_g la latitud del punto de grilla.

En la Figura 4.3 se comparan las curvas obtenidas para el promedio regional (período 1895-1988) utilizando las anomalías sin corregir de Jones y otros (1991) cuando se varía la forma de interpolar a puntos de grilla. $[T_{gJ}]$ representa el promedio regional obtenido a partir de la ecuación 4.3 y $[T'_{gJ}]$ el calculado mediante el promedio aritmético de la región. Como se aprecia en la figura no se presentan diferencias significativas por lo que la posterior discusión se hará exclusivamente con los promedios aritméticos regionales.

En la Figura 4.4 se presentan las anomalías corregidas por calentamiento urbano ($[T_{gu}]$) por medio de la ecuación ecuación (4.1). Asimismo, se presenta el promedio móvil de 10 años correspondiente a la curva.

De la comparación de las curvas de $[T_{gJ}]$ y $[T_{gu}]$ se observa que las diferencias conceptuales en la forma de interpolar los puntos de grilla según Jones y

otros (1991), es decir pesando por la inversa de la distancia al punto de grilla y sin aplicar pesos, se traducen en leves variaciones en los resultados obtenidos.

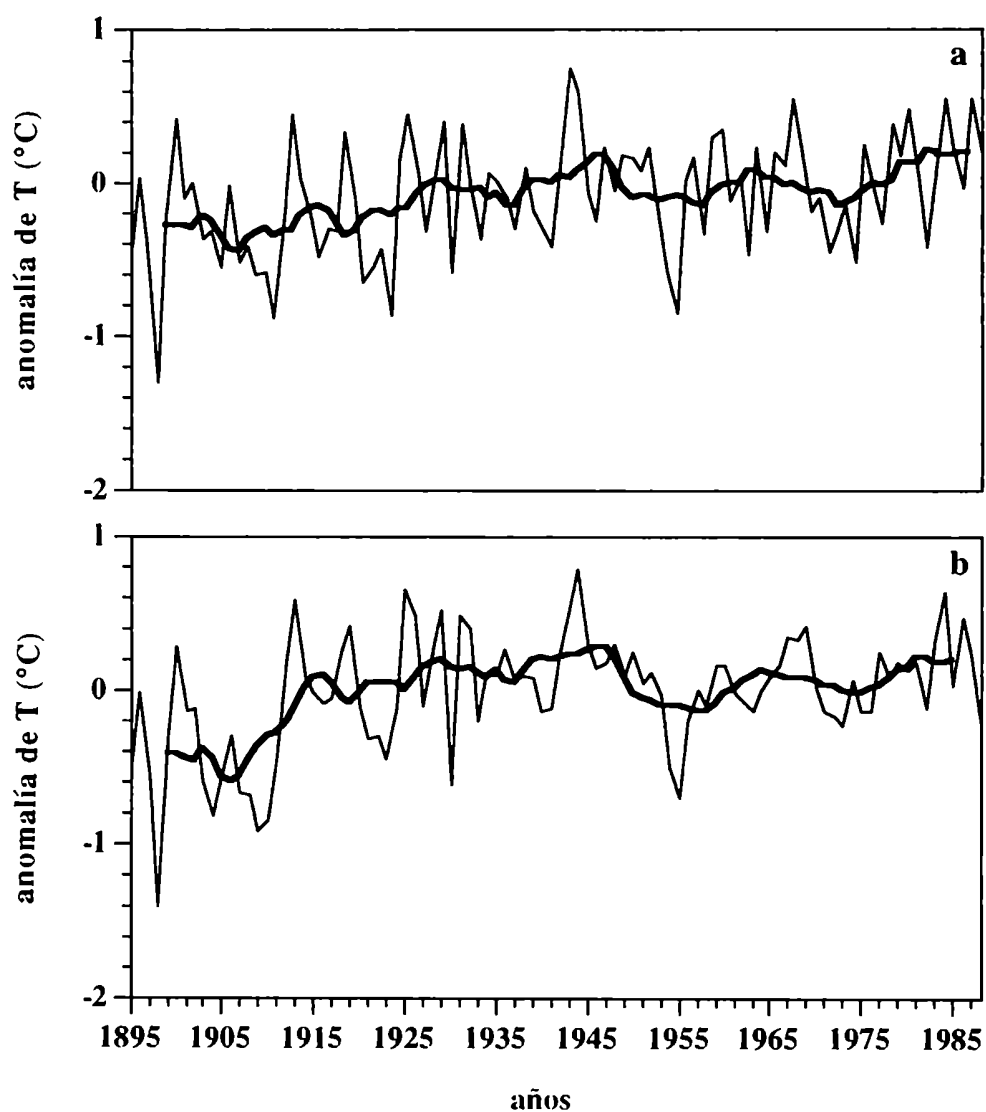


Figura 4.3. Anomalías de temperatura media anual obtenidas según los datos y la metodología propuesta por Jones y otros (1991) (a) y calculadas a partir de los datos de Jones y otros (1991), pero promediando aritméticamente (b).

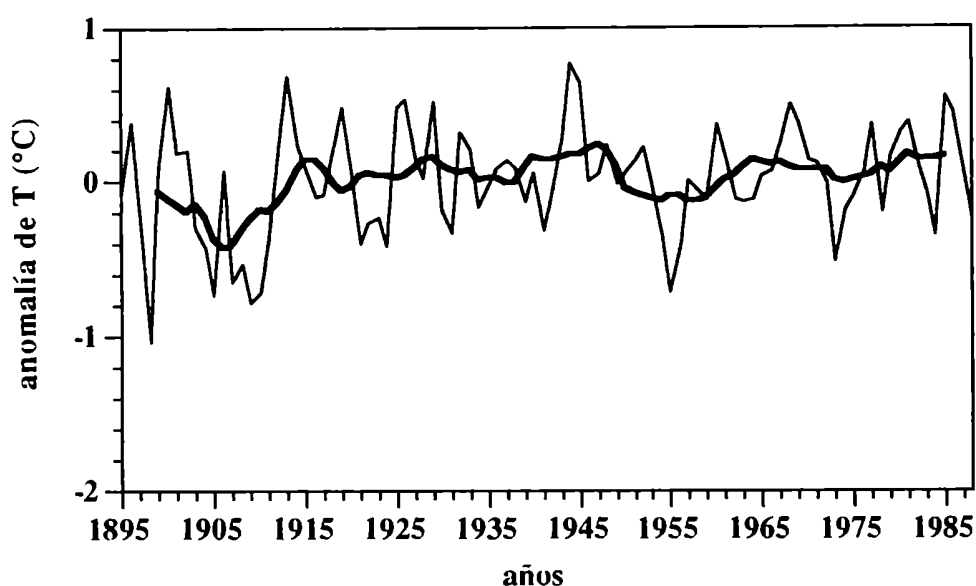


Figura 4.4. Anomalías de temperatura media anual corregidas por calentamiento urbano.

Por otra parte, las correcciones aplicadas en las series, en su mayoría hasta la década del '50, muestran que las mayores diferencias entre los resultados según los datos originales de Jones y otros (1991) y los hallados en esta Tesis se encuentran en el período 1910-1940 y 1965-80.

Las anomalías de los datos sin corregir son más negativas que las obtenidas al corregir por efecto urbano debido a que en el cálculo realizado por Jones y otros (1991) para estimar las temperaturas de referencia con el objeto de hallar las anomalías en cada estación obtiene mayores valores al no eliminar el calentamiento urbano.

Las diferencias a partir de la década del '60 se acentúan debido a que desde 1946 muchas estaciones hasta ese momento urbanas, fueron trasladadas a los aeropuertos de las ciudades ubicados en áreas rurales. Estos cambios de ubicación fueron considerados en las correcciones por urbanización realizados a los datos originales (ver Tabla 4.3).

En la Tabla 4.4 se presentan las tendencias de calentamiento de los datos sin corregir ($[T_{gJ}]$) y de los corregidos por urbanización ($[T_{gu}]$) para el período completo (1895-1988) y para el período de máximo calentamiento (1906-1950).

A partir de la comparación de las tendencias obtenidas se encuentra que la serie construída con los datos de Jones y otros (1991) está fuertemente influenciada por el efecto urbano presentando tendencias magnificadas. Se aprecia que en el período de casi un siglo (1895-1988) la tendencia positiva de la temperatura regional cuando se corrige las temperaturas por efecto urbano es de sólo 0.2°/100 años frente a los 0.5°/100 años calculados con los datos sin correcciones. En el período de mayor calentamiento (1906-1950) estas tendencias son apreciablemente mayores y la diferencia entre ambas series sigue siendo 0.3°/100 años.

serie	período	tendencia
$[T_{gJ}]$	1895-1988	0.5°/100 años
	1906-1950	1.1°/100 años
$[T_{gu}]$	1895-1988	0.2°/100 años
	1906-1950	0.8°/100 años

Tabla 4.4. Tendencias de las series promediadas para la región indicada en la Figura 4.1. $[T_{gJ}]$: según la base de datos de Jones y otros (1991), sin corregir y $[T_{gu}]$: corregida por urbanización, para el período completo y para el de mayor calentamiento (1906-50).

4.4. Conclusiones

En la Argentina, la dependencia del exceso urbano de temperatura con la población de las ciudades es muy similar a la de Australia. Este exceso es inferior, para todo el rango de población, al de Estados Unidos.

En la región analizada se encuentra que las tendencias de la temperatura media anual en el último siglo son débiles y sólo representan menos de la mitad de las estimadas a partir de los datos de Jones y otros (1991). Estas diferencias se deben a que Jones y otros (1991) incurrieron en el error de no identificar las series provenientes de estaciones ubicadas dentro de ciudades y utilizaron las mismas sin aplicar correcciones por urbanización.

El máximo calentamiento regional es de 0.4°C en el período 1906-50, mientras que si se considera el período completo (1895-1988) el calentamiento es de sólo 0.2°C . Estos resultados indicarían que a partir de la década del '50 otros efectos podrían haber actuado para desacelerar el calentamiento. Una de las posibles causas estaría en la mayor actividad volcánica registrada desde mediados del presente siglo (Robock and Mao, 1995).

El efecto de corregir series por efecto urbano se traduce en importantes variaciones de tendencia. Es de esperar que este efecto sea más significativo en regiones donde la mayor parte de la información utilizada en el cálculo de tendencias hemisféricas o regionales provenga de estaciones urbanas, como sucede en amplias zonas de Estados Unidos y Europa.

Los resultados de este análisis demuestran lo acertado de la sugerencia de Karl y Jones (1989) acerca de la importancia de realizar estudios regionales para perfeccionar el conocimiento de las tendencias globales de la temperatura de superficie. Sin embargo, no parece correcta su extrapolación para todo el

hemisferio norte del calentamiento urbano espúreo que determinaron para Estados Unidos de 0.1°C para el período 1901-84.

CAPITULO V

Análisis de la tendencia de la temperatura en la región subtropical de Argentina: impacto del calentamiento regional

Se analiza el efecto del calentamiento regional en las estimaciones de la componente urbana de series de temperatura de Argentina. Se proponen correcciones por este efecto y se calculan nuevamente las tendencias de la temperatura para la región subtropical de Argentina considerada en el capítulo anterior.

5.1. Introducción

En el capítulo III se demostró que en el área metropolitana de Buenos Aires, si bien la población ha ido incrementándose en forma continua desde comienzos de siglo, la diferencia urbano-rural entre las temperaturas medias anuales (ΔT_{u-r}) presenta una tendencia negativa a partir de mediados de la década del '60. Asimismo se encontró una correlación negativa significativa entre la intensidad media anual de la isla urbana de calor y la temperatura rural.

Entre las posibles causas del comportamiento observado en la evolución temporal de la IUC de la ciudad de Buenos Aires, estarían el desplazamiento hacia el sur de la posición del máximo secundario de presión sobre la costa atlántica de

Sudamérica que traería aparejados cambios en la circulación y en la temperatura de la región, así como también el efecto del calentamiento regional que tendería a disminuir la IUC durante años relativamente más cálidos. Estos factores podrían explicar el cambio de tendencia observado a partir de mediados de la década del '60.

En este capítulo se estudia si la correlación negativa hallada entre ΔT_{u-r} y la temperatura rural (T_r) para la ciudad de Buenos Aires se observa en otras ciudades de Argentina, considerando a T_r como representativa de las condiciones atmosféricas regionales.

5.2. Diferencia urbana-rural de la temperatura media anual en función de la temperatura rural

Las nueve ciudades consideradas para este análisis son las indicadas en la Figura 4.1. Las mismas fueron seleccionadas según la disponibilidad de información simultánea en estaciones urbanas y rurales próximas. En algunos casos, como Buenos Aires, Rosario, Corrientes y Goya, para algunos períodos se tomó como información de referencia la obtenida a través del modelo geográfico propuesto en el capítulo II.

Los coeficientes de correlación lineal (R) hallados entre ΔT_{u-r} y T_r para las nueve ciudades argentinas analizadas se presentan en la Tabla 5.1. Asimismo, se indican la cantidad de datos utilizados en cada caso (N) y el nivel de significancia de cada coeficiente.

Se observa que, con excepción de Córdoba, donde la correlación es positiva, y de Tucumán, donde prácticamente no existe correlación, hay una relación inversa entre calentamiento regional e intensidad del calentamiento urbano.

El comportamiento atípico de Córdoba podría explicarse por la diferencia de altura entre las dos estaciones ($\Delta h=49$ m).

La ciudad de Córdoba se encuentra emplazada en una depresión en relación con sus alrededores y con el aeropuerto y por lo tanto es razonable esperar que un mayor calentamiento regional intensifique las diferencias entre la ciudad y su entorno.

Con respecto a la ciudad de Tucumán sucedería algo similar a lo que ocurre con Córdoba, ya que la estación urbana (Tucumán Aero) se encuentra 30 m por debajo de la estación rural (Tucumán Observatorio). En ambos casos se trata de localizaciones con una topografía compleja que puede dar lugar a comportamientos diferentes a los que se pueden esperar en la llanura.

Las correlaciones negativas, con bastante significación estadística, entre la temperatura rural y el exceso de calentamiento urbano están indicando que existe una relación lineal entre ambas variables.

La causa física de la correlación hallada es que el exceso urbano de temperatura es mayor en condiciones de alta estabilidad hidrostática, mayormente asociadas a bajas temperaturas en superficie. Es por ello que en los años más cálidos, en los que estas situaciones son menos frecuentes, el exceso urbano de temperatura resulta generalmente menor (Lee, 1975).

ciudad	estación urbana	estación rural	R	N	nivel de significancia (%)
Buenos Aires	Bs.As. Observatorio	Buenos Aires (*)	-0.50	63	99
La Plata	La Plata Observatorio	La Plata Aero	-0.30	17	80
Rosario	Rosario	Rosario (*)	-0.70	15	95
Corrientes	Corrientes	Aero-Corrientes (*)	-0.30	44	95
Concordia	Concordia	Concordia (*)	-0.32	25	90
Córdoba	Córdoba Observatorio	Córdoba Aero	0.27	39	90
Tucumán	Tucumán Aero	Tucumán Observatorio	0.02	18	no significativo
Santa Fe	Inmaculada Concepción	Sauce Viejo Aero	-0.15	11	60
Goya	Goya	Goya-Goya (*)	-0.25	14	80

Tabla 5.1. Coeficientes de correlación (R) entre ΔT_{u-r} y T_r para ciudades argentinas (*) significa que se utilizó el modelo geográfico para calcular la temperatura rural de la ciudad). N es la cantidad de datos.

5.3. Corrección de temperatura por componente urbana y por efecto de calentamiento regional

En la Figura 5.1. se presenta el coeficiente de la regresión (a) entre ΔT_{u-r} y T_r en función de la población para las ciudades indicadas en la Tabla 5.1.

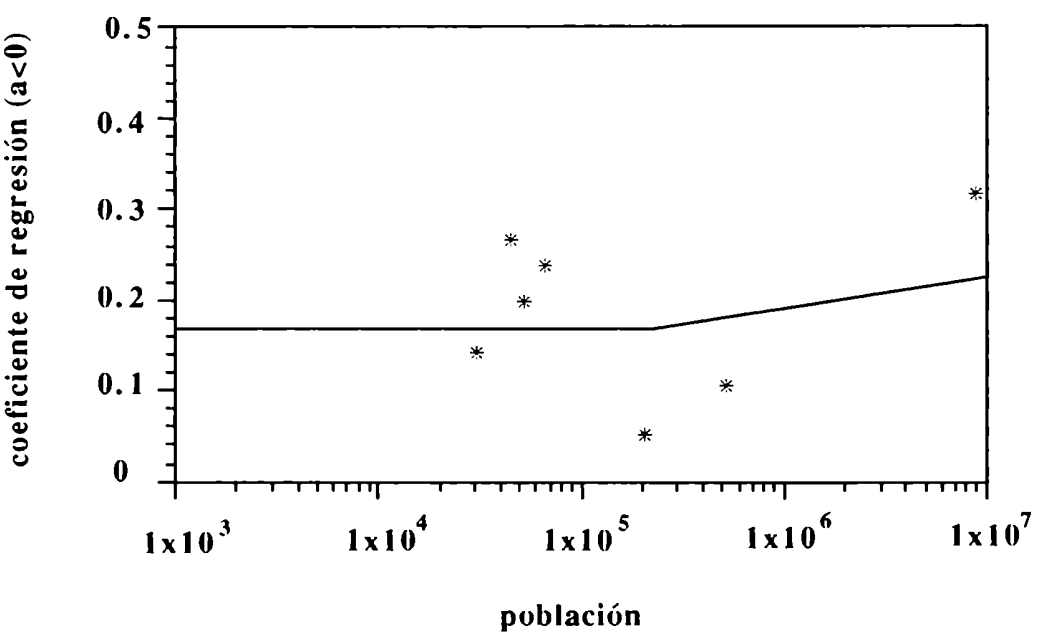


Figura 5.2. Coeficiente de regresión ($a < 0$) entre la intensidad media anual de la isla urbana de calor (ΔT_{u-r}) y la temperatura rural (T_r) para diversas ciudades de Argentina.

Debido a la dispersión de los datos se considera un valor constante para el rango de poblaciones menores a 250.000 habitantes y luego un ajuste lineal:

$$a = \begin{cases} 0.168 & \text{POB} \leq 250.000 \text{ hab} \\ 1.74 \cdot 10^{-8} \text{ POB} + 0.164 & \text{POB} > 250.000 \text{ hab} \end{cases}$$

Esta función propuesta es utilizada en aquellas estaciones listadas en la Tabla 5.2, que habiendo sido identificadas como urbanas, no fue posible estimar la intensidad del calentamiento urbano ΔT_{u-r} , por falta de temperaturas rurales de referencia.

estación	latitud(°S)	longitud (°W)
Río Cuarto	33°07'	64°14'
Pehuajó	35°52'	61°56'
Junín	34°33'	60°55'
Santa Rosa	36°34'	64°16'
Paso de los Libres	29°43'	57°06'
Pilar	31°40'	63°53'
San Juan	31°36'	68°33'
Catamarca	28°36'	65°46'
Salta	24°51'	65°29'

Tabla 5.2. Estaciones para las que se utilizó la función del coeficiente de regresión (a) en función de la población.

La anomalía de temperatura de cada estación urbana, corregida por los efectos de urbanización y calentamiento regional puede ser calculada de acuerdo con los pasos que se indican a continuación.

El efecto de calentamiento regional puede ser modelado como:

$$(T_u - T_r)_i = a T_{r_i} + b + e_i \quad (5.1)$$

donde a y b son los coeficientes de regresión y e es el error del modelo.

Por medio de una regresión lineal es posible calcular el coeficiente a para cada par de estaciones en el período en que existe información disponible. Para el cálculo de las anomalías, en el período de referencia (1951-70) vale la expresión (5.1):

$$(T_u - T_r)_{ref} = a T_{ref} + b + e_{ref} \quad (5.2)$$

De modo que restando (5.1) y (5.2) y despreciando la diferencia ($e_i - e_{ref}$) se obtiene:

$$A(T_r)_i = A(T_u)_i / (a+1) \quad (5.3)$$

donde A se refiere a la anomalía de la variable incluida en el paréntesis que le sigue.

Por otra parte T_{uoi} , temperatura urbana observada el año i , no sólo varía por las condiciones meteorológicas sino también por la modificación de las condiciones urbanas que como se ha visto en el capítulo IV, pueden parametrizarse en primera aproximación por la población de acuerdo con la ecuación (4.1). De esta manera si se quiere descontar el efecto del crecimiento de la población, T_{uoi} debe ser modificado de acuerdo con la ecuación (4.1). En consecuencia, como:

$$A(T_u)_i = T_{ui} - T_{uref} \quad (5.4)$$

y,

$$T_{ui} = T_{uoi} - F(P_i) + F(P_{ref}) \quad (5.5)$$

donde P_{ref} es la población media del período de referencia.

$$A(T_r)_i = (T_{uoi} - T_{uref} - F(P_i) + F(P_{ref})) / (a+1) \quad (5.6)$$

En la Figura 5.2 se presentan las anomalías de temperatura de las ciudades de Buenos Aires y Río Cuarto corregidas por urbanización (según la metodología indicada en el capítulo IV) y por efecto urbano más calentamiento regional. Se observa que la corrección es especialmente apreciable en el caso de Buenos Aires y magnifica las anomalías, aumentando por lo tanto las tendencias, y que el efecto de corregir por la variación de la temperatura regional es de sentido opuesto, como era de esperar, al de la corrección por urbanización.

La temperatura media de la región indicada en la Figura 4.1, corregida por efecto del crecimiento urbano y el calentamiento regional se muestra en la Figura 5.3. La comparación con los resultados obtenidos al corregir la temperatura sólo por efecto urbano y sin aplicar correcciones se muestra en la Tabla 5.3, donde se presentan las tendencias de la temperatura corregida por calentamiento regional ($[T_{gur}]$) y se repiten las tendencias de $[T_{gu}]$ y $[T_{gj}]$ indicadas en la Tabla 4.4, para facilitar el análisis.

Se encuentra que la corrección por efecto urbano y regional no introduce diferencias en la tendencia del período 1895-1988, pero sí en el período 1906-1950. Ello se debe a que un alto porcentaje de las estaciones pasaron a ser rurales a partir de 1950, introduciendo un efecto adicional a los aquí discutidos.

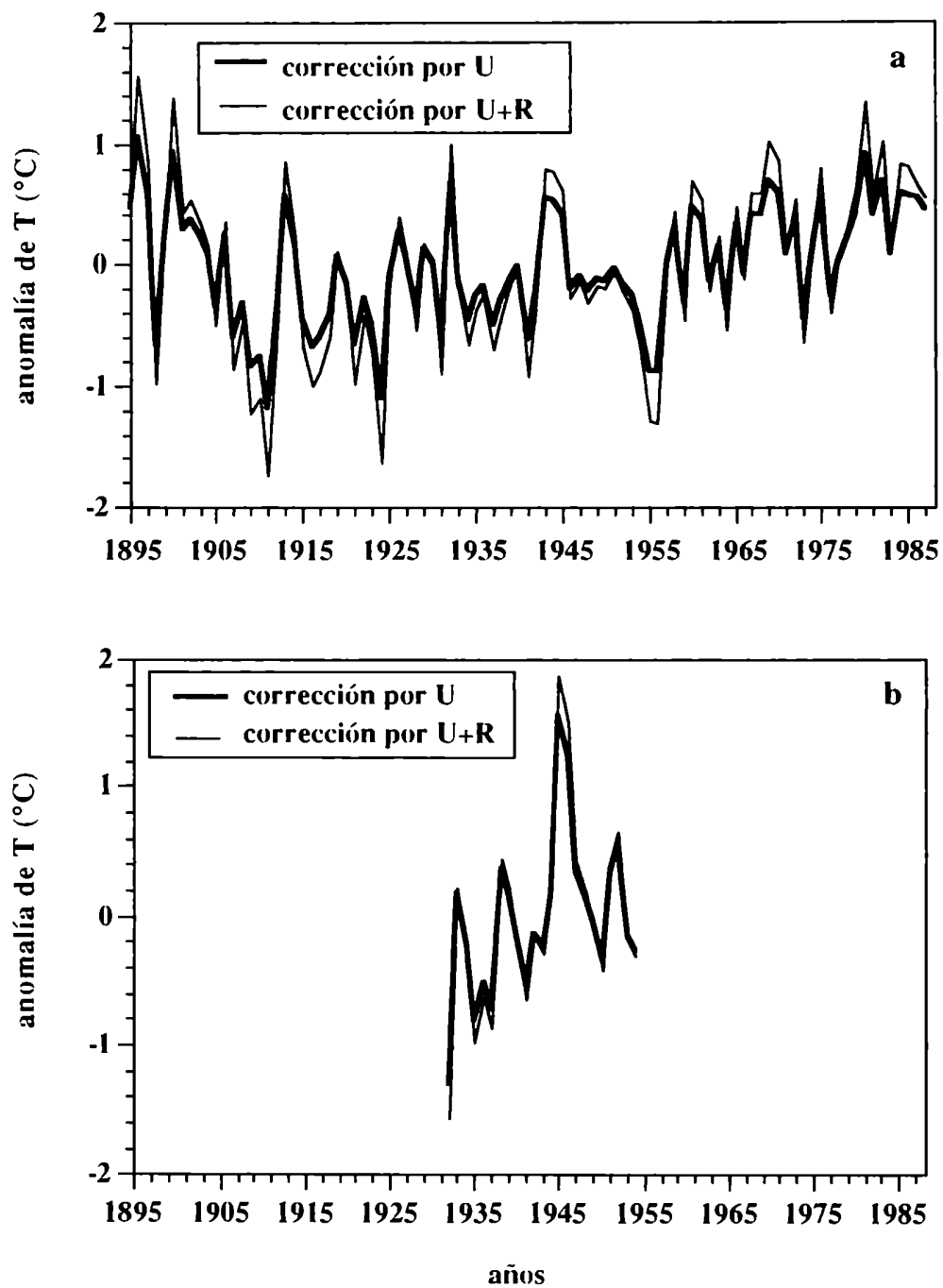


Figura 5.2. Anomalías de temperatura media anual para las ciudades de Buenos Aires (a) y Río Cuarto (b), corregidas por urbanización (U) y por urbanización y calentamiento regional (U+R).

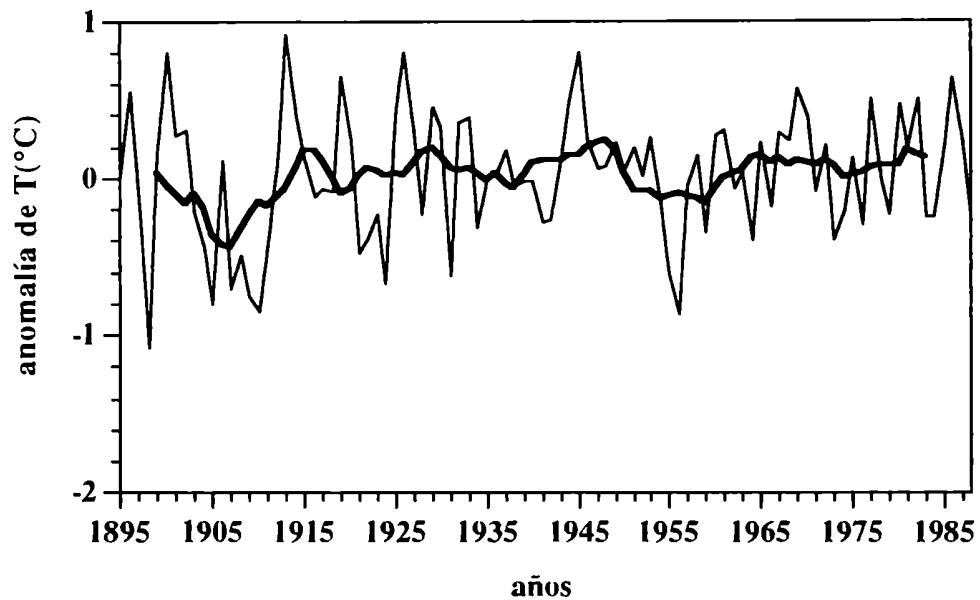


Figura 5.3. Anomalías de temperatura media anual corregidas por calentamiento urbano y regional.

serie	período	tendencia
[T _{ej}]	1895-1988	0.5°/100 años
	1906-1950	1.1°/100 años
[T _{gu}]	1895-1988	0.2°/100 años
	1906-1950	0.8°/100 años
[T _{gur}]	1895-1988	0.2°/100 años
	1906-1950	0.9°/100 años

Tabla 5.3. Tendencias de las series promediadas para la región indicada en la Figura 4.1: [T_{ej}] (según la base de datos de Jones y otros (1991), sin corregir) y [T_{gu}] (corregida por urbanización) y [T_{gur}] (corregida por urbanización y calentamiento regional), para el período completo y para el de mayor calentamiento (1906-50).

5.4. Conclusiones

La correlación entre la temperatura media anual de las áreas rurales y el exceso urbano de temperatura de las ciudades argentinas analizadas es negativa, indicando la posibilidad de que este exceso esté siendo sobrestimado en las correcciones de temperatura por urbanización.

El método propuesto para descontar el efecto del calentamiento regional en cada una de las series donde se evaluó el efecto urbano permite estimar que en el caso de la región estudiada esta sobrestimación alcanzaría $0.1^{\circ}/100$ años en el período de mayor calentamiento entre 1906 y 1950.

CAPITULO VI

Impacto del calentamiento regional en el cálculo de tendencias de temperatura a nivel regional o hemisférico

Se analiza el si el efecto de calentamiento regional que afecta las estimaciones de la componente urbana de la temperatura de series de Argentina también está presente en otras regiones como Australia y Estados Unidos. Se estima la magnitud de este efecto en series de temperatura de escala hemisférica.

6.1. Introducción

De acuerdo con los resultados obtenidos en el capítulo V, es importante tener en cuenta, en aquellos estudios tendientes a contestar la pregunta referida a si la Tierra se está calentando, que el crecimiento de la población no es el único aspecto a tener en cuenta al corregir series por efectos de urbanización.

Mientras que el desarrollo urbano podría haber producido una sobrestimación de 0.1°C en las tendencias de temperatura del hemisferio norte de las primeras ocho décadas de este siglo (Jones y otros, 1989), la disminución del efecto urbano debido al calentamiento global podría estar conduciendo hacia una subestimación del calentamiento actual.

En este capítulo se analiza si la correlación negativa hallada entre la intensidad media anual de la isla urbana de calor y la temperatura rural para ciudades de Argentina se encuentra también en otras partes del mundo como Australia y Estados Unidos.

6.2. Información utilizada

Se consideran seis pares de estaciones urbano-rurales australianos que fueron seleccionados según Coughlan y otros (1989), provenientes de cuatro de las ciudades más importantes. Las temperaturas medias mensuales a partir de las cuales se calculan los promedios anuales fueron extraídas del World Monthly Surface Station Climatology (NCAR, 1992).

Para el análisis de información de Estados Unidos se consideran 31 pares de estaciones que fueron elegidos de acuerdo con los trabajos de Kukla y otros (1986) y Karl y otros (1988). Los datos utilizados pertenecen a la U.S. Historical Climatology Network (HCN) (Quinlan y otros, 1987).

En las Figuras 6.1 y 6.2 se muestra la ubicación de las ciudades de Estados Unidos y Australia consideradas.

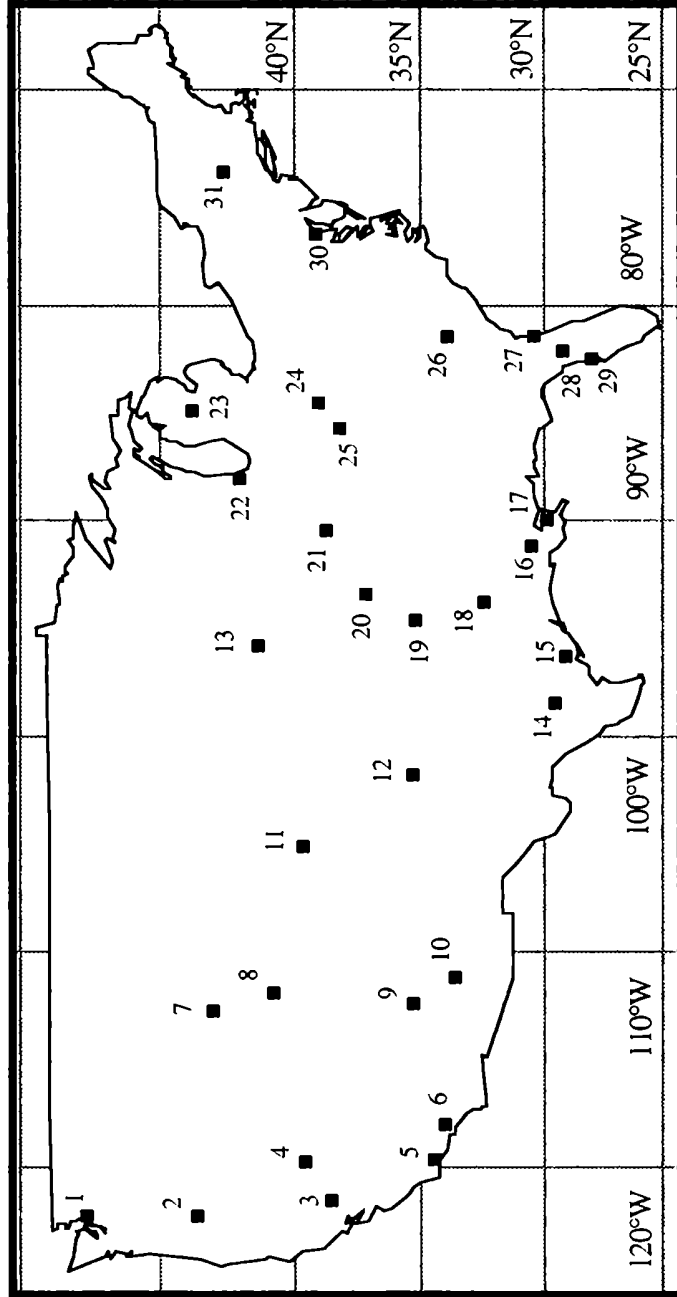


Figura 6.1. Ubicación de ciudades de Estados Unidos consideradas para analizar el impacto del calentamiento rural sobre el efecto urbano.

1: Seattle, 2: Portland, 3: Sacramento, 4: Reno, 5: Ojai, 6: Los Angeles, 7: Aberdeen, 8: Salt Lake City, 9: Williams, 10: Roosevelt, 11: Denver, 12: Amarillo, 13: Omaha, 14: San Antonio, 15: Danevang, 16: Baton Rouge, 17: New Orleans, 18: Shreveport, 19: Fort Smith, 20: Springfield, 21: St. Louis, 22: Chicago, 23: Mount Pleasant, 24: Cincinnati, 25: Louisville, 26: Columbia, 27: Fernandina Beach, 28: Tampa, 29: Ocala, 30: Baltimore, 31: Albany.

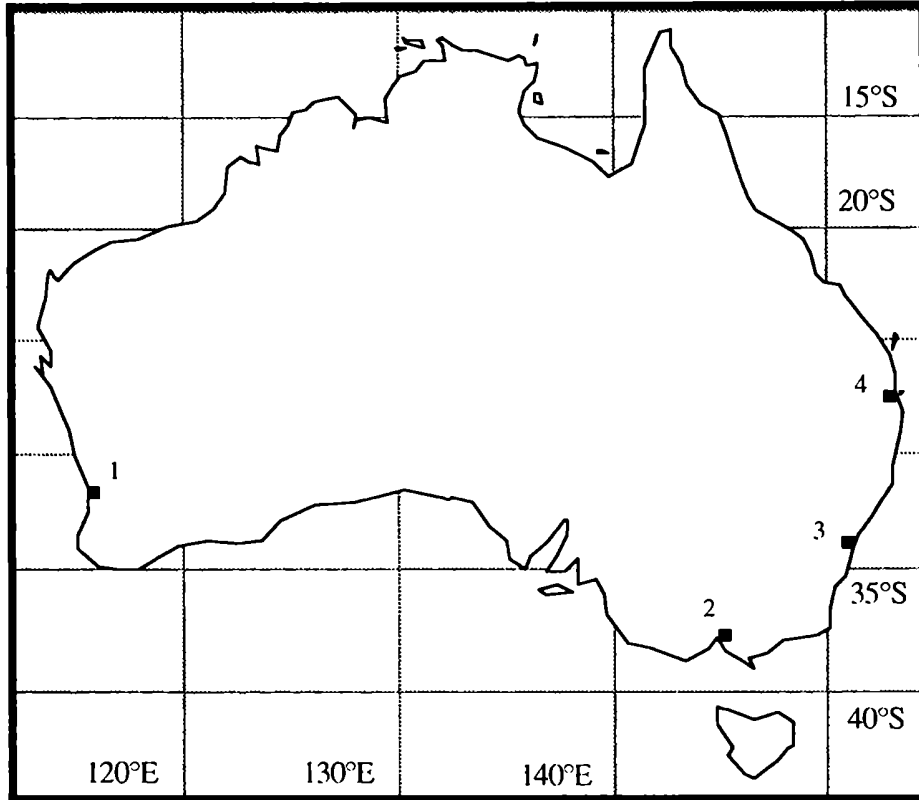


Figura 6.2. Ciudades australianas consideradas para analizar la influencia del calentamiento rural sobre el efecto urbano.

1: Perth, 2: Melbourne, 3: Sidney, 4: Brisbane.

6.3. Regresiones lineales entre la intensidad media de la isla urbana de calor y la temperatura rural

Se calculan regresiones lineales entre la intensidad media anual de la isla urbana de calor (ΔT_{u-r}) y la anomalía de la temperatura rural:

$$\Delta T_{u-r} = a (T_r - \bar{T}_r) + b \quad (6.1)$$

Las anomalías fueron calculadas en la mayoría de los casos respecto del período 1951-70.

En la Tabla 6.1 se muestran los coeficientes de correlación (R), junto con su nivel de significancia y la cantidad de datos (N) considerados para cada par de estaciones.

Como se observa en la Tabla, la totalidad de los coeficientes son negativos y presentan altos niveles de significancia. El 76% del total de casos analizados muestra coeficientes de correlación con niveles de significancia iguales o superiores al 90%, confirmando la relación inversa entre temperatura rural y calentamiento urbano. Si se considera que la temperatura rural es representativa de las condiciones atmosféricas regionales, se podría esperar entonces un menor calentamiento de origen antropogénico durante los años relativamente más cálidos.

Este resultado estadístico, observado para ciudades de Argentina, Australia y Estados Unidos tendría su explicación basada en distintos trabajos que relacionan la intensidad de la isla urbana de calor, el gradiente vertical de temperatura de las capas más próximas al suelo y la estabilidad atmosférica (Chandler, 1965; Lee, 1975; Godowith y otros, 1985).

El calentamiento urbano es mayor en casos de gran estabilidad en los niveles cercanos al suelo, en general asociados a procesos de enfriamiento y con capas de mezcla de poca altura. Sin embargo, después de varias horas de insolación o durante períodos cálidos, las condiciones de estabilidad son frecuentemente inestables y la capa de mezcla abarca una mayor porción de la atmósfera, permitiendo de esta forma una rápida disipación del calor (Holzworth, 1974; Mazzeo y Gassmann, 1990).

ciudad	estación urbana	estación rural	R	N	nivel de significancia (%)
AUSTRALIA					
Melbourne	Regional Office	Laverton	-0.62	21	99
"		East Sale	-0.10	21	60
Sidney	Sidney	Richmond	-0.72	10	99
"		Nowra	-0.71	10	95
Brisbane	Brisbane	Amberley	-0.43	17	95
Perth	Perth	Perth Airport	-0.42	10	80
ESTADOS UNIDOS					
Amarillo	Amarillo	Vega	-0.40	54	99
Baltimore	Baltimore	Woodstock	-0.34	95	99
Cincinnati	Cincinnati	Cambridge	-0.45	88	99
Denver	Denver	Cheesman	-0.33	75	99
Ft. Smith	Ft. Smith	Ozark	-0.60	73	99
Louisville	Louisville	Shelbyville	-0.69	87	99
New Orleans	New Orleans	Houma	-0.53	55	99
Omaha	Omaha	Logan	-0.34	102	99
Portland	Portland	Lewiston	-0.56	98	99
Reno	Reno	Fallon	-0.47	79	99

Tabla 6.1. Coeficientes de correlación (R) entre ΔT_{u-r} y T_r para ciudades de Australia y Estados Unidos. N es la cantidad de datos.

ciudad	estación urbana	estación rural	R	N	nivel de significancia (%)
Sacramento	Sacramento	Colfax	-0.81	80	99
San Antonio	San Antonio	Blanco	-0.58	73	99
Shreveport	Shreveport	Plain Dealing	-0.70	77	99
Springfield	Springfield	Lockwood	-0.44	73	99
St. Louis	St. Louis	LA Starks	-0.39	75	99
Tampa	Tampa	St. Leo	-0.16	34	75
Salt Lake City	Salt Lake City	Morgan	-0.42	74	99
Los Angeles	Los Angeles	San Bernardino	-0.03	83	60
Albany	Albany	Tweed	-0.39	144	99
Chicago	Chicago	Lansing	-0.17	108	95
Seattle	Seattle	Buckley	-0.14	66	80
Aberdeen	Aberdeen	Mellette	-0.32	27	90
Baton Rouge	Baton Rouge	Bunkie	-0.11	18	60
Williams	Williams	Fort Valley	-0.39	41	60
Roosevelt	Roosevelt	Childs	-0.54	22	99
Ocala	Ocala	Inverness	-0.27	13	99
Ojai	Ojai	Santa Barbara	-0.41	40	99
Mount Pleasant	Mount Pleasant	Hart	-0.26	15	80
Fernandina Beach	Fernandina Beach	Federal Point	-0.08	16	60
Columbia	Columbia	Newberry	-0.26	66	95
Danevang	Danevang	Hallettsville	-0.44	14	90

Tabla 6.1. Continuación

En la Figura 6.3 se muestra el coeficiente de regresión (a) en función de la población, hallado para las ciudades de Australia y Estados Unidos analizadas en este capítulo y para las consideradas en el capítulo V para Argentina. Debido a la gran dispersión en los datos, se considera que no existe dependencia con la población del coeficiente a y por lo tanto, se tomará un coeficiente promedio de -0.28.

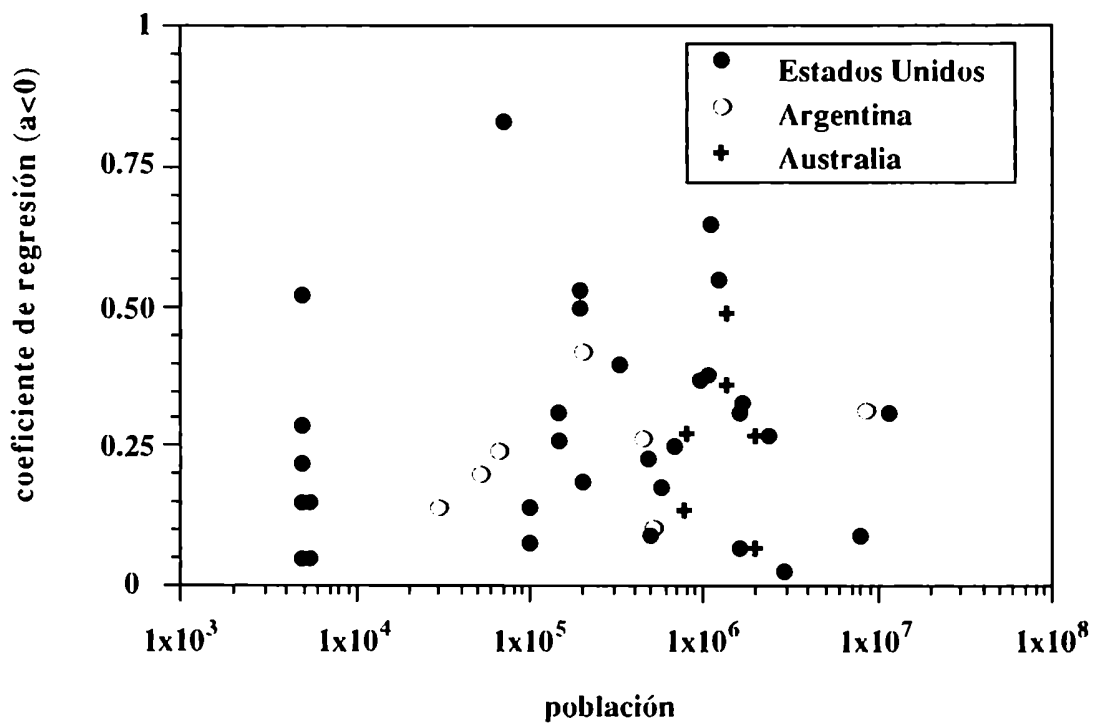


Figura 6.3. Coeficiente de regresión entre la intensidad media anual de la isla urbana de calor (ΔT_{ur}) y la temperatura rural para ciudades de Estados Unidos, Argentina y Australia.

6.4. Corrección de series de temperatura regionales o hemisféricas por efecto del calentamiento rural

Jones y otros (1989) calculan un incremento de 0.31°C en la temperatura media anual del período 1901-84, para la región delimitada por 30°N a 50°N y 70°W a 120°W , que incluye principalmente a Estados Unidos. Asimismo, estiman que este calentamiento tendría una componente urbana espúrea de $0.1 \pm 0.05^{\circ}\text{C}$.

El ejercicio que se presenta a continuación intenta obtener una primera aproximación acerca del orden de magnitud del efecto del calentamiento regional en la corrección por efecto urbano sobre la tendencia hallada para Estados Unidos por Jones y otros (1989), ya que no se puede aplicar la metodología propuesta en el capítulo V por no disponer de datos censales de población en varias ciudades de ese país.

Considerando el coeficiente de regresión promedio, hallado en la sección anterior, es de -0.28 , un calentamiento regional de 0.31°C producirá una disminución del efecto urbano de 0.09°C . Debido a que sólo el 60% de las estaciones meteorológicas consideradas en el análisis de Jones y otros (1989) debieron ser corregidas por crecimiento poblacional, la reducción del calentamiento urbano será de 0.05°C .

El resultado obtenido sugiere que la corrección por urbanización basada exclusivamente en el aumento de la población podría estar siendo prácticamente compensada cuando se considera el efecto del calentamiento regional.

El mismo tipo de consideración se puede realizar para el hemisferio norte, ya que Jones y otros (1989) extrapolaron sus resultados para Estados Unidos a todo el hemisferio.

Por lo tanto, debido a que la corrección por calentamiento urbano es casi del mismo orden de magnitud pero signo contrario a la de calentamiento regional, es probable que las tendencias de temperatura de escala regional, hemisférica o global estén siendo subestimadas cuando la información es corregida únicamente por efectos urbanos considerando la población.

En el caso del hemisferio sur, la sobrestimación del crecimiento urbano podría ser mayor que para el hemisferio norte, debido a que las series de temperatura hemisféricas muestran un aumento persistente durante los últimos 50 años (Jones y otros, 1986b).

6.5. Conclusiones

Wood (1988) sugiere que la comunidad científica tiene la responsabilidad de asegurar que las tendencias de la temperatura de superficie hemisféricas y globales consideradas en estudios de cambio climático sean lo más confiables posible. Es por este motivo que considera necesario chequear si persisten efectos urbanos no filtrados en varios de los trabajos más frecuentemente citados sobre calentamiento global como los realizados por Jones y otros (1986a, 1986b).

Por otra parte, los coeficientes de correlación negativos hallados entre la intensidad media anual de la isla urbana de calor y la temperatura rural para varias ciudades de Argentina, Australia y Estados Unidos, sugieren que las tendencias de temperatura hemisférica y global podrían estar siendo subestimadas. Los resultados hallados indican que la aplicación de factores de corrección por efecto urbano, dependientes sólo del aumento de la población, producirían una sobrestimación del efecto de isla urbana de calor.

Para el hemisferio norte, la subestimación del calentamiento hemisférico sería de 0.05°C para el período 1901-84, que es de casi el mismo orden de

magnitud que el calentamiento urbano de $0.1 \pm 0.05^{\circ}\text{C}$ hallado por Jones y otros (1989). En el hemisferio sur sería esperable que la subestimación de las tendencias hemisféricas fuera mayor ya que el crecimiento urbano se ha desacelerado, por lo menos en varias ciudades argentinas en los últimos años, mientras que la temperatura muestra un aumento persistente (Jones y otros , 1986b).

Los resultados hallados para las tres regiones analizadas, Argentina, Australia y Estados Unidos, indican la importancia de estudiar la presencia de una correlación negativa entre la intensidad media anual de la isla urbana de calor y la temperatura rural en otras partes del mundo, como uno de los caminos conducentes a obtener estimaciones cada vez más confiables sobre las tendencias de la temperatura de superficie en escalas regional, hemisférica y global.

CAPITULO VII

Conclusiones

Se resumen las conclusiones obtenidas a partir de los resultados presentados en los capítulos II a VI y se presentan las conclusiones finales.

En el capítulo II se presenta un modelo geográfico a partir del cual se puede estimar la temperatura media anual o quinquenal de superficie de cualquier punto de la región nordeste de Argentina y que puede ser utilizado para estimar la intensidad media anual de la isla urbana de calor de ciudades de la región, en el caso de que no se disponga de información de temperatura rural de referencia. Se encuentra que:

- ✓ el modelo geográfico, basado en técnicas de análisis de regresión, es una herramienta útil para la simulación de series de temperatura locales o regionales en áreas con gradientes horizontales suaves de las propiedades de superficie,
- ✓ el modelo requiere poca información de entrada y puede ser utilizado hasta con un mínimo de 8 estaciones,

✓ el modelo permite calcular la temperatura media anual de cualquier punto del área de análisis con un error cuadrático medio igual o menor a 0.6°C . En el caso de promedios quinquenales, este error se reduce a 0.4°C .

En el capítulo III se aplica el modelo propuesto para estimar la intensidad media anual de la isla urbana de calor (IUC) de la ciudad de Buenos Aires. Se encuentra que:

✓ las estimaciones de la temperatura media anual "rural" de Buenos Aires obtenidas por medio del modelo geográfico permiten reemplazar a la estación Ezeiza como estación rural de referencia para estimar el efecto urbano de la ciudad de Buenos Aires. Este resultado es de considerable utilidad debido a la proximidad de Ezeiza al límite urbano del área metropolitana,

✓ la utilización del modelo permite retrotraer el análisis de las diferencias urbano-rurales de la temperatura media anual de Buenos Aires de 1947 a 1929,

✓ la isla de calor de Buenos Aires muestra un aumento persistente hasta mediados de la década del '60, pero a partir de esa fecha la diferencia urbana-rural de temperatura no sólo no aumentó sino que muestra un suave decrecimiento. Debido a que la población aumentó considerablemente en los últimos 30 años, la explicación de este comportamiento debe encontrarse en un cambio de las condiciones meteorológicas o morfológicas de la ciudad,

✓ se analizaron cuatro factores como posibles causas del cambio de tendencia observado en la intensidad media anual de la IUC a partir de mediados de la década del '60: cambios en las características geográficas de la ciudad, el impacto de la contaminación del aire, el efecto del calentamiento regional y cambios en la circulación regional.

✓ entre las posibles causas analizadas se encuentra que no existen variaciones importantes en la morfología de la ciudad, en especial en la franja costera que es la zona que se encuentra a barlovento de la estación urbana Observatorio Central Buenos Aires con mayor frecuencia anual. Tampoco la contaminación del aire parecería actuar como un factor determinante para la intensidad de la IUC,

✓ el desplazamiento hacia el sur de la posición del máximo secundario de presión sobre la costa atlántica de Sudamérica y sus consecuentes cambios en la circulación y en la temperatura de la región, así como el efecto del calentamiento regional que tiende a disminuir la IUC durante años relativamente más cálidos, son factores que podrían explicar el cambio de tendencia observado en la intensidad de la IUC a partir de mediados de la década del '60.

En el capítulo IV se evalúa la componente urbana en la tendencia de la temperatura media anual de la región norcentral de Argentina, obtenida a través de una de las bases de datos más comúnmente utilizadas en estudios de cuantificación de tendencias hemisféricas y globales, como es la base de datos producida por Jones y otros (1991). Se encuentra que:

✓ en la Argentina, la dependencia del exceso urbano de temperatura con la población de las ciudades es muy similar a la de Australia y es inferior, para todo el rango de población, al de Estados Unidos,

✓ en la región norcentral de Argentina se encuentra que las tendencias de la temperatura media anual en el último siglo son débiles y sólo representan menos de la mitad de las estimadas a partir de los datos de Jones y otros (1991). Estas diferencias se deben a que Jones y otros (1991) incurrieron en el error de no identificar las series provenientes de estaciones ubicadas dentro de ciudades y utilizaron las mismas sin aplicar correcciones por urbanización,

✓ el máximo calentamiento regional es de 0.4°C en el período 1906-50, mientras que si se considera el período completo (1895-1988) el calentamiento es de sólo 0.2°C . Estos resultados indicarían que a partir de la década del '50 otros efectos podrían haber actuado para desacelerar el calentamiento. Una de las posibles causas estaría en la mayor actividad volcánica registrada desde mediados del presente siglo (Robock y Mao, 1995).

✓ el efecto de corregir series por efecto urbano se traduce en importantes variaciones de tendencia. Es de esperar que este efecto sea más significativo en regiones donde la mayor parte de la información utilizada en el cálculo de tendencias hemisféricas o regionales provenga de estaciones urbanas, como sucede en amplias zonas de Estados Unidos y Europa,

✓ los resultados de este análisis demuestran lo acertado de la sugerencia de Karl y Jones (1989) acerca de la importancia de realizar estudios regionales para perfeccionar la estimación de las tendencias globales de la temperatura de superficie.

En el capítulo V se analiza si la correlación negativa hallada entre la intensidad media anual de la IUC de Buenos Aires y la temperatura rural está presente en otras ciudades de Argentina y se evalúa su impacto en el cálculo de la tendencia de la temperatura media de superficie de la región norcentral de Argentina. Se encuentra que:

✓ la correlación entre la temperatura media anual de las áreas rurales y el exceso urbano de temperatura de las ciudades argentinas analizadas es negativa, indicando la posibilidad de que este exceso esté siendo sobrestimado en las correcciones de temperatura por urbanización,

✓ el método propuesto para descontar el efecto del calentamiento regional en cada una de las series donde se evaluó el efecto urbano permite estimar que en el caso de la región estudiada esta sobrestimación alcanzaría $0.1^{\circ}/100$ años en el período de mayor calentamiento entre 1906 y 1950.

En el capítulo VI se estudia si la correlación negativa entre la intensidad media anual de la IUC y la temperatura rural está presente en ciudades de Australia y Estados Unidos. Asimismo se evalúa el impacto del efecto del calentamiento regional en la estimación de tendencias de temperatura en escalas regional o hemisférica. Se encuentra que:

✓ los coeficientes de correlación negativos hallados entre la intensidad media anual de la isla urbana de calor y la temperatura rural para varias ciudades de Argentina en el capítulo V, y de Australia y Estados Unidos en el capítulo VI, sugieren que las tendencias de temperatura hemisférica y global podrían estar siendo subestimadas,

✓ los resultados hallados indican que la aplicación de factores de corrección por efecto urbano, dependientes sólo del aumento de la población, producirían una sobrestimación del efecto de isla urbana de calor,

✓ para el hemisferio norte, la subestimación del calentamiento hemisférico sería de 0.05°C para el período 1901-84, que es de casi el mismo orden de magnitud que el calentamiento urbano de $0.1 \pm 0.05^{\circ}\text{C}$ hallado por Jones y otros (1989),

✓ en el hemisferio sur sería esperable que la subestimación de las tendencias hemisféricas fuera mayor que en el hemisferio norte ya que el crecimiento urbano se ha desacelerado, por lo menos en varias ciudades argentinas en los últimos años, mientras que la temperatura muestra un aumento persistente (Jones y otros, 1986b).

Los resultados hallados para las tres regiones analizadas, Argentina, Australia y Estados Unidos, indican la importancia de estudiar la presencia de una correlación negativa entre la intensidad media anual de la isla urbana de calor y la temperatura rural en otras partes del mundo, como uno de los caminos conducentes a obtener estimaciones cada vez más confiables sobre las tendencias de la temperatura de superficie en escalas regional, hemisférica y global.

A partir de los resultados hallados, las conclusiones finales son:

- ✓ el modelo geográfico propuesto es una herramienta útil para estimar la temperatura media anual "rural" de localidades localizadas en regiones de topografía sencilla, como la analizada en Tesis, cuando no se dispone de información,
- ✓ el efecto de la urbanización sobre la temperatura media anual es un fenómeno complejo y su magnitud depende no sólo del aumento de la población, sino también de aspectos relacionados con el comportamiento atmosférico en escala regional como cambios de circulación y aumento de temperatura,
- ✓ se obtienen reducciones en las tendencias de la temperatura media anual de la región norcentral de Argentina, al aplicar correcciones por urbanización y por efecto del calentamiento regional,
- ✓ la relación inversa entre exceso urbano de calor y calentamiento regional se observa, además de en Argentina, en otras partes del mundo como Estados Unidos y Australia, por lo que se establece que probablemente existan errores en las tendencias de temperatura hemisféricas y globales calculadas por diferentes autores y que no consideran este efecto,

✓ la comunidad científica tiene la responsabilidad de asegurar que las tendencias de la temperatura de superficie hemisféricas y globales consideradas en estudios de cambio climático sean lo más confiables posible. Es por este motivo, y de acuerdo con los resultados obtenidos en esta Tesis, que es necesario chequear si están presentes efectos urbanos no filtrados u otros no considerados, como el de la reducción del impacto urbano ante la presencia de calentamiento regional, en varios de los trabajos más frecuentemente citados sobre calentamiento global.



Inés Camilloni
Doctoranda



Vicente Barros
Director

REFERENCIAS

- ACKERMAN, B. 1985. *Temporal march of the Chicago heat island*. J. Clim. Appl. Meteorol. 24: 547-554.
- BISCHOFF, S.A. y Coronel, A.S. 1989. *Características estadísticas de las masas de aire en la tropósfera de la región húmeda argentina*. Geoacta 16: 207-219.
- BORNSTEIN, R.D. 1968. *Observations of the urban heat island effect in New York City*. J. Appl. Meteorol. 7: 575-582.
- CAMILLONI, I.A. y Mazzeo, N.A. 1987. *Algunas características térmicas de la atmósfera de la ciudad de Buenos Aires*. Anales del II Congreso Interamericano y V Congreso Argentino de Meteorología. Buenos Aires. 14.2.1-14.2.5.
- CHANDLER, T.J. 1962. *London's urban climate*. Geogr. J. 127: 279-302.
- CHANDLER, T.J. 1965. *The climate of London*. Hutchinson & Co., London.
- CHANDLER, T.J. 1967. *Absolute and relative humidities in towns*. Bull. Amer. Meteor. Soc. 48, 394-399.
- CLARKE, J.F. and Peterson, J.T. 1973. *An empirical model using eigenvectors to calculate the temporal and spatial variations of the St. Louis' heat island*. J. Appl. Meteor. 12, 195-210.
- COLACINO, M. and Rovelli, A. 1983. *Yearly averaged air temperature in Rome from 1782 to 1975*. Tellus A 35, 389-397.

- COUGHLAN, M.G., Tapp, N.R. and Kininmonth, W.R. 1989. *Trends in Australian temperature records*. In: Observed climate variations and change: contributions in support of Section 7 of the 1990 IPCC Scientific Assessment. Intergovernmental Panel on Climate Change: 1-28.
- DETTWILLER, J. 1970a. *Evolution séculaire du climat de Paris (Influence de l'urbanisme)*. Mem. Meteorol. Natl. Paris 52, 83 pp.
- DETTWILLER, J. 1970b. *Deep soil temperature trends and urban effects at Paris*. J. Appl. Meteorol. 9: 178-180.
- DUARTE, M.L. 1993. Temporal variations of the vertical profile of temperatures of Argentina. Int. J. of Climatology 13: 437-445.
- DRAPER, N. and Smith, H. 1966. *Applied regression analysis*. John Wiley & Sons, New York.
- DRONIA, H. 1967. *Der Stadteinfluss auf den weltweiten temperaturtrend*. Meteor. Abh. Inst. Meteorol. Geophys. Berl. 74, 64 pp.
- FUKUI, E. 1970. *The recent rise of temperature in Japan*. Jpn. Progr. Climatol., Tokyo Univ. of Education: 46-65.
- GODOWITCH, J.M., Ching, J.K.S. and Clarke, J.F. 1985. *Evolution of the nocturnal inversion layer at an urban and nonurban location*. J. Clim. Appl. Meteorol. 24: 791-804.
- GOLDREICH, Y. 1987. *Advertent/inadvertent changes in the spatial distribution of*

rainfall in the central coastal plain of Israel. Clim. Change 11: 361-373.

GRILLO, J.N. and Spar, J. 1971. *Rain-snow mesoclimatology of the New York metropolitan area. J. Appl. Meteorol. 10: 56-61.*

HAGE, K.D. 1972. *Urban growth effects on low-temperature fog in Edmonton. Bound. Layer Meteor. 2, 334-347.*

HANSEN, J. and Lebedeff, S. 1987. *Global trends of measured surface air temperature. J. Geophys. Res. 92: 13345-13372.*

HOFFMANN, J.A.J. 1975. *Climatic atlas of South America. World Meteorological Organization, Geneva.*

HOFFMANN, J.A.J. 1990. *De las variaciones de la temperatura en la Argentina y la zona subantártica adyacente desde 1903 a 1985. In: Preprints of the First Latin American Conference on Geophysics and Spatial Antarctic Research, Buenos Aires, 1990. Centro Latinoamericano de Física, Buenos Aires, 160-168.*

HOLZWORTH, G.C. 1972. *Mixing heights, wind speed and potential for air pollution in the Contiguous United States. Office of Air Programmes Publ. N°A.P.-101. United States Environmental Protection Agency, Washington D.C.*

HOLZWORTH, G. 1974. *Climatological aspects of the composition and pollution of the atmosphere. WMO Tech. Note No. 139.*

HOUGHTON, J.T; Jenkins, E.J. and Ephraumus, J.J. (eds.). 1990. *Climatic Change: The Scientific Assessment. Cambridge University Press, Cambridge.*

- HOWARD, L. 1833. *Climate of London deduced from meteorological observations* (3rd edn.) Harvey and Darton, London.
- IMAMURA, I.R. and Bornstein, R.D. 1992. *Review of urban climatology and dispersion*. Atmospheric Sciences Laboratory, US Army, 150 pp.
- INDEC. 1991. *Resultados provisionales del Censo Nacional de Población 1991*. Instituto Nacional de Estadística y Censos.
- JAUREGUI, O.E. 1979. *La isla de calor en Toluca, México*. Boletín del Instituto de Geografía N°9, Universidad Nacional Autónoma de México: 27-37.
- JONES, P.D.; Raper, S.C.B.; Bradley, R.S.; Diaz, H.F.; Kelly, P.M. and Wigley, T.M.L. 1986a. *Northern Hemisphere surface air temperature variations: 1851-1984*. J. Clim. Appl. Met. 25, 161-179.
- JONES, P.D.; Raper, S.C.B. and Wigley, T.M. 1986b. *Southern Hemisphere surface air temperature variations 1851-1984*. J. Clim. Appl. Met. 25, 1213-30.
- JONES, P.D.; Kelly, P.M.; Goodess, C.M. and Karl, T.R. 1989. *The effect of urban warming on the Northern Hemisphere temperature average*. J. of Climate 2, 285-290.
- JONES, P.D.; Raper, S.C.B.; Cherry, B.S.G.; Goodess, C.M.; Wigley, T.M.L.; Santer, B.; Kelly, P.M.; Bradley, R.S. and Diaz, H.F. 1991. *An updated global grid point surface air temperature anomaly data set: 1851-1990*. Environmental Sciences Division. Publication No. 3520. 346 pp.

- KARL, T.R.; Diaz,H.F. and Kukla, G. 1988. *Urbanization: its detection and effect in the United States climate record*. J. of Climate 1, 1099-1123.
- KARL, T.R. and Jones, P.D. 1989. *Urban bias in area-averaged surface air temperature trends*. Bull. Am. Meteorol. Soc. 70, 265-270.
- KATSOULIS, R.D. AND Theoharatos, G.A. 1985. *Indications of the urban heat island in Athens, Greece*. J. Clim. Appl. Met. 24, 1296-1302.
- KRATZER, A. 1956. *Das Stadtklima* (2nd edn.) Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig.
- KUKLA, G.; Gavin, J. and Karl, T.R. *Urban warming*. J. Clim. Appl. Meteorol. 25: 1265-1270.
- LANDSBERG, H. 1975. *Atmospheric changes in a growing community*. Inst. Fluid Dynamic Appl. Math. Tech. Note No. BN823. Univ. of Maryland, 54 pp.
- LANDSBERG, H. 1981. *The urban climate*. Academic Press, New York.
- LEE, D.O. 1975. *Rural atmospheric stability and the intensity of London's heat island*. Weather 30: 102-109.
- LINDQUIST, S. 1968. *Studies on the local climate in Lund and its environs*. Lunds Studies in Geography, Ser. A, Phys. Geograph 42: 79-93.
- LOMBARDO, M.A. 1985. *A ilha de calor nas metrópoles: o exemplo de Sao Paulo*. Ed. Laleka, Sao Paulo, 244 pp.

- LOWRY, W.P. 1977. *Empirical estimation of urban effects on problem analysis*. J. Appl. Meteorol. 16: 124-135.
- LUDWIG, F.L. and Kealoha, J.H.S. 1968. *Urban climatological studies*. OCD-DAHC-0936. Stanford Research Institute, Menlo Park, CA.
- LUDWIG, F.L. 1970. *Urban temperature fields*. In: Urban Climates. WMO Tech. Note No. 108: 80-112.
- MACHALEK, A. 1977. *Ein beitrage zur vertikalen temperaturverteilung über einer grossstadt*. Ann. Meteorol. 12: 201-204.
- MATSON, M.; McClain, E.P.; McGinnis, D.F. and Pritchard, J.A. 1978. *Satellite detection of urban heat islands*. Mon. Wea. Rev. 106: 1725-1734.
- MAZZEO, N.A. and Gassmann, M.I. 1990. *Mixing heights and wind direction analysis for urban and suburban areas of Buenos Aires city*. Energy and Buildings 15-16, 333-337.
- MAZZEO, N.A. y Gassmann, M.I. 1991. *Capacidad de autodepuración en la atmósfera en la República Argentina*. Anales del Sexto Congreso Argentino de Meteorología: 19-20.
- McCORMICK, R.A. and Kurfis, K.R. (1966). *Vertical diffusion over a city*. Quart. J. Roy. Meteor. Soc. 92: 392-396.
- MINETTI, J.L. y Vargas, W.M. 1983. *Comportamiento del borde anticiclónico subtropical en Sudamérica. Parte I*. Meteorológica Vol. XIV, N°1 y 2: 645-656.

- MINETTI, J.L.; Sierra, E.M. y Poblete, A.G. (1987). *Las fluctuaciones de la circulación regional en Sudamérica*. Anales del II Congreso Interamericano y V Congreso Argentino de Meteorología. Buenos Aires: 12.3.1-12.3.6.
- MITCHELL, J.M. 1953. *On the causes of instrumentally observed secular temperature trends*. J. Meteorol. 10: 244-261.
- MITCHELL, J.M. 1961. *The temperature of cities*. Weatherwise 14: 224-229.
- MORENO GARCÍA, M.C. 1994. *Intensity and form of the urban heat island in Barcelona*. Int. J. of Clim. 14: 705-710.
- OKE, T.R. 1973. *City size and the urban heat island*. Atmos. Environ. 7: 769-779.
- OKE, T.R. 1976. *The distinction between canopy and boundary layer urban heat islands*. Atmosphere 14: 268-277.
- OKE, T.R. 1979. *Review of urban climatology*. WMO Tech. Note No. 169. 100 pp.
- OKE, T.R. 1982. *The energetic basis of the urban heat island*. Quart. J. Roy. Meteor. Soc. 108: 1-24.
- OKE, T.R. and East, C. 1971. *The urban boundary layer in Montreal*. Bound. Layer Meteor. 1, 411-437.
- PETERSON, J.T. 1969. *The climate of cities: a survey of recent literature*. U.S. Dept. of Health, Education and Welfare, Raleigh.
- PICCOLO, M.C. y Steffens, A.C. *Isla de calor invernal en Bahía Blanca*. Anales del

II Congreso Interamericano y V Congreso Argentino de Meteorología, Buenos Aires: 14.1.1.-14.1.5.

PITTOCK, A.B. 1980a. *Patterns of climatic variation in Argentina and Chile - I. Precipitation, 1931-60*. Mon. Wea. Rev. 108, 1348-1361.

PITTOCK, A.B. 1980b. *Patterns of climatic variation in Argentina and Chile - II. Temperature, 1931-60*. Mon. Wea. Rev. 108, 1362-1369.

PORTMAN, D.A. 1993. *Identifying and correcting urban bias in regional time series: surface temperature in China's Northern Plains*. J. of Climate 6: 2299-2308.

PROHASKA, F. 1954. *Bemerkungen zum saekularen gang der temperatur im Sudpolargebiet*. Arch. Meteor. Geophys. Bioklim. B5: 327-330.

QUINLAN, F.T.; Karl, T.R. and Williams, C.N. (Jr.). 1987. *United States historical climatology network (HCN) serial temperature and precipitation data*, NDP-019, Carbon Dioxide Inf. Anal. Cent., Oak Ridge Natl. lab., Oak Ridge, Tenn.

ROBOCK, A. and MAO, J. 1995. *The volcanic signal in surface temperature observations*. J. of Climate 8: 1086-1103.

RUSTICUCCI, M.M. y Vargas, W.M. 1991. *Efecto de la ciudad y el río sobre la temperatura de superficie en Buenos Aires*. Geoacta 18: 35-48.

SPANGLER, W.M. and Jenne, R.L. (1992). *World monthly surface station climatology*. National Centre for Atmospheric Research.

- SUNDBORG, A. 1950. *Local climatological studies of the temperature conditions in an urban area*. Tellus 2: 222-232.
- TERNEUS, A. 1988. *Informe de Beca de Investigación* (CONICET).
- TYSON, P.D.; Du Toit, W.J. and Fuggle, R.F. 1972. *Temperature structure above cities: review and preliminary findings from the Johannesburg urban heat island project*. Atmos. Environ. 6, 533-542.
- VENKATRAM, A. and Viskanta, R. 1977. *Effects of aerosol-induced heating on the convective boundary layer*. J. Atmos. Sci. 34: 1918-1933.
- WIGLEY, T.M.L. and Jones, P.D. 1988. *Do large-area-average temperature series have an urban warming bias?* (Response to the manuscript by F.B. Wood). Climatic Change 12, 313-319.
- WMO 1986. *Proc. of the Tech. Conf. on Urban Climatology and Its Applications with Special regard to Tropical Areas*. Mexico, 1984. WMO No.652, 534 pp.
- WOOD, F.B. 1988. *Comment: On the need for validation of the Jones et al. temperature trends with respect to urban warming*. Climatic Change 12, 297-312.

